



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ANALÝZA TEPELNÝCH VLVIVŮ U OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

THERMAL EFFECTS IN MACHINE TOOLS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Fikejst

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dominik Hermanský

BRNO 2019



Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Ondřej Fikejsl**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Dominik Hermanský**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza tepelných vlivů u obráběcích strojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Působením pohybových mechanismů (kuličkové šrouby, pohony, převody...) vznikají teplotní gradienty napříč celou strukturou obráběcího stroje. Vniklé teplo negativně ovlivňuje výslednou přesnost. Úkolem student je provést rešerši v oblasti teplotních změn, které vedou k výrobní nepřesnosti u obráběcích strojů.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše v oblasti teplotních deformací u obráběcích strojů.

Zhodnocení aktuálních trendů v oblasti predikce a následné kompenzace teplotních chyb u výrobních strojů.

Analýza vybrané části stroje z hlediska teplotních změn.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

PAVELEK, Milan. Termomechanika. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. MM speciál. ISBN 978-80-214-4300-6.

INCROPERA, Frank P. Fundamentals of Heat Transfer. 1. vyd. New York: John Wiley, 1981. MM speciál. ISBN 978-80-214-4300-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je odbornou rešerší zabývající analýzou tepelných vlivů u obráběcích strojů a následně jejich kompenzací. Práce je rozdělena na tři hlavní části. V první části jsou vysvětleny základní pojmy a teplotní senzory, kterými lze měřit tepelné chyby. Druhá část se věnuje tepelným vlivům působícím na obráběcí stroj, dále také způsobům jejich kompenzace. V poslední části je analyzována konkrétní část obráběcího stroje včetně uvedených příkladů od výrobců a jejich metod bránění se výše zmíněným tepelným vlivům.

KLÍČOVÁ SLOVA

teplota, tepelná analýza, kompenzace tepelné chyby, vřeteno, obráběcí stroj

ABSTRACT

This bachelor's thesis is specialized search dealing with thermal effects in machine tools and then their compensation. This work is divided into three main parts. First part explains the basic terms and temperature sensors that can be used to measure thermal errors. Second part deals with the thermal influences acting on machine tool, as well as the methods of their compensation. Last part analyzes the specific part of the machine tool including the examples from the manufacturers and their methods of preventing the above-mentioned thermal effects.

KEYWORDS

temperature, thermal analysis, thermal error compensation, spindle, machine tool

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FIKEJSL, O. *Analýza tepelných vlivů u obráběcích strojů*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Dominik Hermanský.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Dominika Hermanského a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....
Ondřej Fikejzl

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Dominiku Hermanskému za cenné rady a připomínky. Zároveň bych rád poděkoval svým rodičům za veškerou podporu během let studia.

OBSAH

Úvod	10
1 Základní pojmy.....	11
1.1 Teplota	11
1.2 Teplo	12
1.3 Přenos tepla	12
1.3.1 Vedení (kondukce)	13
1.3.2 Proudění (konvekce).....	13
1.3.3 Záření (sálání, radiace)	14
1.4 Diferenciální rovnice energie	15
2 Teplotní senzory	16
2.1 Dotykové teplotní senzory	17
2.1.1 Kovové odporové senzory	17
2.1.2 Polovodičové odporové senzory	20
2.1.3 Monolitické PN senzory teploty	23
2.2 Bezdotykové senzory	24
2.2.1 Pyrometry	24
2.2.2 Termovizní systémy	24
3 Tepelná charakteristika u obráběcích strojů	25
3.1 Vnější rušivé vlivy	25
3.2 Vnitřní rušivé vlivy	25
3.3 Rozložení teplot v obráběcím procesu	26
3.4 Tepelná dilatace při obráběcím procesu.....	27
3.5 Způsoby měření tepelných dilatací	28
3.5.1 Měřicí metoda ETVE podle ISO normy 230-3	28
3.5.2 Bezkontaktní měřicí zařízení	30
4 Kompenzace tepelných chyb	31
4.1 Pasivní kompenzace	32
4.1.1 Materiály.....	32
4.1.2 Konstrukce.....	35
4.1.3 Chlazení vřetena	35
4.2 Aktivní kompenzace	36

4.2.1 Metoda konečných prvků (FEM)	37
4.2.2 Metoda konečných diferencí (FDM)	37
4.2.3 Metoda konečných prvků a diferencí (FDEM).....	38
4.2.4 Regresní analýza.....	40
4.2.5 Vícenásobná lineární regrese (MLR)	41
4.2.6 Přenosová funkce.....	42
4.2.7 Neuronové sítě (NN)	43
5 Analýza vybrané části stroje	44
5.1 Rozbor vyskytujících se tepelných deformací u vřetena	44
5.1.1 Tepelná charakteristika.....	44
5.1.2 Shrnutí experimentu tepelné analýzy vřetena.....	45
5.2 Korekce vřetena a ložisek při obráběcím procesu	46
5.2.1 Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii (RCMT) 46	
5.2.2 Způsob kompenzace tepelných vlivů firmou OKUMA	48
6 Zhodnocení aktuálních kompenzačních metod	50
Závěr	52
Použité informační zdroje	53
Seznam použitých zkratk a symbolů	56

Úvod

V dnešní době je při výrobě u obráběcích strojů kladen velký důraz na přesnost výroby v řádech jednotek tisícín. Výrobní nepřesnosti u obráběcích strojů jsou způsobeny mnoha zdroji chyb. Mezi ty nejdůležitější se dají zařadit například termomechanické chyby, geometrické chyby, kinematické chyby, dynamické síly, zatížení, řízení pohybu či řídicí software a další. Deformace způsobené tepelnými zdroji v řadě případů přesahují deformace od statických sil, což znamená, že samotná tepelná chyba může způsobovat až 75 % celkových geometrických nepřesností v celém výrobním procesu. Právě z tohoto důvodu je s co největší přesností velice důležité vědět, do jaké míry ovlivňuje teplota vlastnosti strojů a přístrojů. Jenom malý rozdíl v několika stupních vede k nedodržení požadovaných výrobních tolerancí. [1]

Až donedávna dávali výrobci obráběcích strojů zodpovědnost za zprávu těchto tepelných chyb uživatelům obráběcích strojů. Dnes již tuto zodpovědnost berou výrobci často na sebe. Tato změna nastala právě proto, že si uživatelé uvědomili, že srovnatelné obráběcí stroje mohou vykazovat výrazně odlišné tepelné chyby, a že se u některých obráběcích strojů většina dodávané energie používá ke stabilizaci teplot. [2]

Tepelnou stabilitu obráběcích strojů, kterou se snaží všichni výrobci omezit, ovlivňují rušivé vlivy, které lze rozdělit do dvou hlavních skupin. Jedná se o vnitřní a vnější zdroje tepelných chyb. Je však zřejmé, že kvůli neustálému střídání provozních režimů a změnám teploty okolí není prakticky možné tepelné stability u obráběcích strojů dosáhnout. Ovšem největší podíl na vzniku tepla má pohyb částic, který vzniká provozem daného stroje. Z toho důvodu začali výrobci obráběcích strojů pracovat na účinných kompenzačních metodách, které zde byly představeny a následně ohodnoceny.

1 Základní pojmy

1.1 Teplota

Jedná se o základní skalární fyzikální veličinu SI a termodynamickou stavovou veličinu, která popisuje stavy ustálených makroskopických systémů a střední energie tohoto pohybu. Stav termodynamické rovnováhy je charakterizován termodynamickou teplotou, která musí být stejná pro všechny části izolované soustavy. Je to jedna z mála veličin, kterou nelze měřit přímo, ale pouze prostřednictvím jiných fyzikálních veličin (např. změna objemu, tlaku).[3]

Existuje hned několik stupnic, ze kterých lze teplotu odečítat. Tyto stupnice jsou v závislém poměru, díky kterému lze teploty mezi sebou převádět:

Termodynamická stupnice, jejíž počátek je dán termodynamickou absolutní nulou. Základní jednotkou teploty v této stupnici je kelvin [K]. Kelvin je definován zvolením termodynamické teploty trojného bodu vody, tj. rovnovážného stavu tří skupenství vody (ledu, vody a syté páry), který byl stanoven na pevně danou hodnotu $T = 273,16 \text{ K}$.

Celsiova (teplotní) stupnice je odvozena od Kelvinovy termodynamické stupnice posunutím o teplotu $273,15 \text{ K}$, což je hodnota o $0,01 \text{ K}$ nižší než termodynamická teplota trojného bodu vody. Jednotkou Celsiovy stupnice je stupeň Celsia $^{\circ}\text{C}$. Celsiův stupeň je roven jednomu kelvinu a platí mezi nimi následující vztah:

$$t = T - 273,15^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

Fahrenheitova (teplotní) stupnice je další používaná stupnice v několika státech převážně v USA, Japonsku a Austrálii. Pro její převod platí následující vztah:

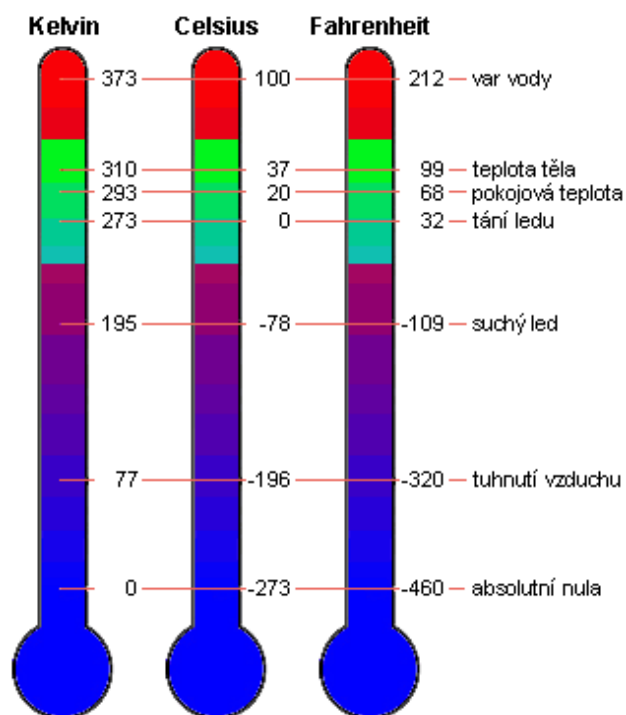
$$t_F = \frac{9}{5} * t + 32^{\circ}\text{F} \quad (2)$$

Chceme-li měřit teplotu, je zapotřebí znát jisté skutečnosti, které nám říká **nultý zákon** termodynamiky. „*Jsou-li různé soustavy A a B v tepelné rovnováze se soustavou C, pak je i soustava A v tepelné rovnováze se soustavou B.*“ [4] Jeho matematické znění vypadá následovně:

$$\text{Pokud } T_A = T_C \quad \text{a} \quad T_B = T_C \quad \text{pak je } T_A = T_B$$

Tento zákon je významný hlavně pro měření teploty, jelikož můžeme zvolit třetí soustavu nebo látku jako standard – teploměr, díky kterému je možné porovnávat teploty jiných soustav, aniž by byly v přímém styku.

Princip měření teploty je nejčastěji prováděn sledováním roztažnosti pevných látek, kapalin nebo i plynů a na principu sledování změn elektrických vlastností látek (termoelektrického napětí, odporu aj.). [4]



Obr. 1 Porovnání teplotních stupnic [5]

1.2 Teplo

Jedná se o formu přenosu energie mezi soustavou a okolím. Značí se Q a jeho jednotka je Joule. Teplo není stavovou veličinou, ale je definováno kalorimetrickou rovnicí. [4]

$$Q_{12} = m * c * (T_2 - T_1) \quad (3)$$

kde Q – teplo
 m – hmotnost soustavy
 T_1 – počáteční teplota
 T_2 – konečná teplota

Může vznikat např. spalováním (okysličováním) nebo jinými chemickými reakcemi, technickou prací (komprimováním plynů), třením, zářením (slunečním), průchodem elektrického proudu odporem, jadernou reakcí, atd.

Teplo je ekvivalentní jiným druhům energie, a proto je možné tyto různé druhy energií vzájemně přepočítat. Přepočet dříve užívaných jednotek je [6]:

$$\begin{aligned} 1 \text{ kcal} &= 4186 \text{ J} = 4,186 \text{ KJ} \\ 1 \text{ kpm} &= 9,81 \text{ J} = 2,724 \cdot 10^{-6} \text{ kWh} \\ 1 \text{ kWh} &= 3600 \text{ J} = 860 \text{ kcal} \end{aligned}$$

1.3 Přenos tepla

Přenosem tepla se rozumí výměna tepelné energie, což je termodynamický děj, mezi dvěma tělesy s různou teplotou. Pro přenos tepla z okolí do soustavy musí existovat teplotní gradient nebo rozdíl teplot. Přenos tepla (termokinetika) řeší, jak je možné přenést určité množství tepla do nebo ze soustavy a zároveň tuto veličinu kvantifikovat. Výměna tepelné energie vždy

probíhá tak, že teplejší těleso předává část své vnitřní energie chladnějšímu tělesu. Existují tři druhy mechanismů přenosů tepla [7]:

- Vedení (kondukce)
- Proudění (konvekce)
- Záření (sálání, radiace)

1.3.1 Vedení (kondukce)

Nejběžnějším mechanismem přenosu tepla je vedení (kondukce). Vzniká, při existenci teplotního gradientu ve stacionárním médiu, které může být pevné nebo tekuté. Během tohoto způsobu přenosu energie jsou nosiči mikročástice a přenos se uskutečňuje jejich pohybem a vzájemnými interakcemi. Přenos energie směřuje od více energetických částic k méně energetickým částicím. Tyto částice mohou být molekuly (kapaliny a plyny) nebo atomy resp. volné elektrony (tuhé látky, např. kovy). Vedení tepla popisuje Fourierův zákon.

Fourierův zákon:

Pro jednorozměrné (1D) vedení tepla rovinnou stěnou:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S} \quad (4)$$

kde \dot{Q} – celkový tepelný tok
 \dot{q} – měrný tepelný tok
 S – plocha, ke které je vztažen tepelný tok

Pro trojrozměrné (3D) těleso:

$$\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla} T = -\lambda \text{grad} T \quad (5)$$

Kde $\vec{\nabla} T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k}$ – teplotní gradient
 λ [W/mK] – tepelná vodivost

V tomto zákoně je tepelná vodivost kromě toho, že se jedná o fyzikální vlastnost látky, také konstantní hodnotou. Ve skutečnosti se nejedná o konstantní hodnotu. Uvažování konstantní hodnoty tepelné vodivosti zjednodušuje výpočty. V reálných situacích je funkcí teploty. Je-li možné použít následující zjednodušení, závisí na druhu látky a na velikosti teplotního gradientu. [7, 8]

1.3.2 Proudění (konvekce)

Proudění označuje při různých teplotách přenos tepla, který se vyskytuje mezi povrchem a pohyblivou tekutinou. Přenos tepla prouděním (konvekcí) je složený ze dvou částí:

- Pohyb molekul – difúze (podobně jako vedení tepla) – KONdukce
- Makroskopický pohyb molekul – v určitém okamžiku se velké množství molekul pohybuje kolektivně – adVEKCE

Složením těchto dvou mechanismů vznikne přenos tepla prouděním – KONVEKCE

Nejčastěji dochází k přenosu tepla mezi proudící tekutinou a nějakým povrchem, za předpokladu, že mají rozdílné teploty. V blízkosti povrchu se vytvoří hydrodynamický mezní vrstva, kde se mění rychlost tekutiny z nuly až na tzv. rychlost volného proudu. Konvekce může být klasifikována podle povahy proudění:

- Nucená
- Přirozená (volná)
- Kombinovaná

Při volné konvekci je pohyb vyvolaný rozdílem teplot mezi stěnou a tekutinou, což způsobí rozdíl hustot tekutiny u stěny a v tekutině a tím také její pohyb. Při vynucené konvekci je pohyb vyvolaný rozdílem tlaků v tekutině, tedy vnějšími silami (čerpadlo, ventilátor...). Základním zákonem, který se řídí konvekčním přenosem energie, je Newtonův ochlazovací zákon:

$$q = \alpha_1(T_s - T_t) \text{ nebo } q = \alpha_1(T_t - T_s) \quad (6)$$

Hustota konvekčního tepelného toku je úměrná rozdílu teplot mezi stěnou (T_s) a tekutinou (T_t). Konstanta úměrnosti je součinitel přestupu tepla konvekcí α_1 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}$]. [7]

1.3.3 Záření (sálání, radiace)

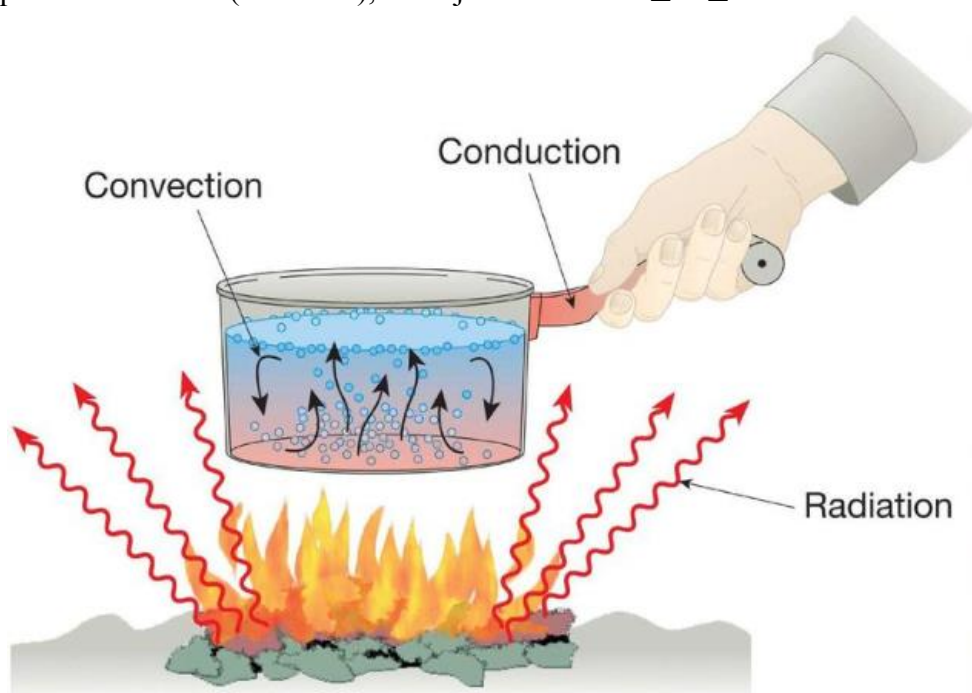
Z každého povrchu, který má nějakou teplotu, je emitovaná energie. Tento proces je nazývaný tepelné záření. Záření je proces, který k přenosu energie nepotřebuje hmotnou látku, může probíhat i v absolutním vákuu. Maximální tepelný tok, který může být z povrchu emitovaný, je daný Stefan-Boltzmannovým zákonem:

$$q = E_o = \sigma T^4 \quad (7)$$

kde $q = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$] je Stefanova-Boltzmannova konstanta a T je teplota povrchu. Index „o“ označuje tzv. černé těleso, což je ideální zářič, které vyzařuje maximální možnou energii. Pro každý reálný povrch platí [7]:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (8)$$

kde ε je poměrná zářivost (emisivita), která je v rozmezí $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

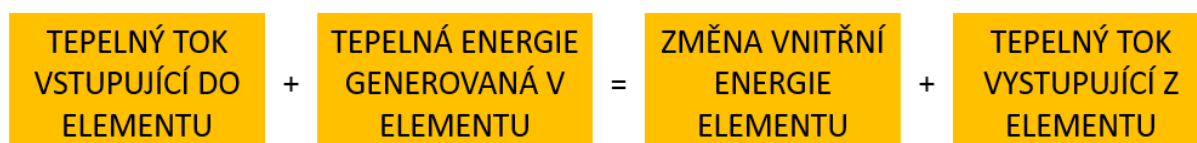


Obr. 2 Druhy přenosů tepla [9]

1.4 Diferenciální rovnice energie

U nekomplikovaných úloh je lehké vypočítat tepelný tok napříč tělesem. U praktických inženýrských úloh je ale potřebné vyřešit kompletní teplotní pole a určit např. extrémní teplotní gradienty a s tím spojené deformace, případně teplotní napětí. K určení teplotních polí v tělesech, je potřeba nějaký nástroj. Tento nástroj je diferenciální rovnice energie, někdy nazývaná i rovnice tepelné difúze nebo zkráceně rovnice vedení tepla. Rovnice tepelné difúze je základním stavebním prvkem při určování teplotních polí, deformací, tepelných toků a napětí numerickými metodami matematiky, zejména metodou konečných prvků. [7]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_{zdroj} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$



Obr. 3 Energetická bilance pro elementární objemový element [7]

2 Teplotní senzory

Teplotní senzory jsou funkčními prvky tvořící vstupní blok měřicího řetězce, tj. blok, který je v přímém kontaktu s měřeným prostředím. Pojem senzor teploty se rovná pojmu snímač teploty (samostatná konstrukční součást teploměrového zařízení, která obsahuje teplotní čidlo), ale také pojmu čidlo teploty (část snímače převádějící teplotu na jinou vhodnou fyzikální veličinu). Senzor se také může označovat jako detektor tepelného zařízení nebo teploměr (zařízení k měření teploty).

Dle fyzikálního principu existuje několik typů senzorů, které se dělí na odporové, termoelektrické, polovodičové s PN přechodem, dilatační, optické, radiační, chemické, šumové, akustické, magnetické, a další jako například kapacitní, aerodynamické...

Na základě styku s měřeným prostředím se dají tepelné senzory rozdělit na dotykové a bezdotykové. Podle transformace signálu se senzory teploty dělí na aktivní a pasivní. Aktivní senzory se vlivem působením teploty stávají zdrojem elektrické energie (termoelektrické články). Pasivní senzory, u kterých je s výjimkou chemických indikátorů teplot nutné elektrické napájení pro transformaci teploty na jinou fyzikální veličinu, protože je měření teploty vždy měřením nepřímým. [10]

Základní rozdělení teplotních senzorů [3]:

- Dotykové teplotní senzory
 - ❖ Kovové odporové
 - platinové, niklové, měděné
 - ❖ Polovodičové odporové
 - Termistory
 - Negastory (NTC termistory)
 - Pozistory (PTC termistory)
 - Monokrystalické Si senzory
 - Senzor SiC
 - ❖ Monolitické PN senzory teploty
 - Diodové PN senzory teploty
 - Tranzistorové PN senzory teploty
 - Monolitické (integrované) PN senzory teploty
- Bezdotykové teplotní senzory
 - ❖ Pyrometry
 - Tepelné
 - Kvantové
 - ❖ Termovizní systémy
 - S opticko-mechanickým rozkladem
 - S maticovým detektorem

2.1 Dotykové teplotní senzory

2.1.1 Kovové odporové senzory

Kovové odporové senzory fungují na principu teplotní závislosti odporu kovu. Kov si lze představit jako soubor kladných iontů umístěných v mřížkových bodech krystalické mřížky a elektronového plynu, který je tvořen souborem chaoticky se pohybujících elektronů.

Konduktivitu kovů lze vyjádřit následujícím vztahem [11]:

$$\sigma = ne^2 \frac{\tau}{m} \quad (10)$$

kde σ – konduktivita
 n – počet elektronů v jednotkovém objemu
 e – elementární náboj
 τ – relaxační čas elektronů
 m – hmotnost elektronů

U kovů je jediným teplotně závislým parametrem relaxační čas, jehož hodnota se vyskytuje v řádech 10^{-3} . Pro teploty v rozmezí 0 °C až 100 °C lze použít lineární vztah:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (11)$$

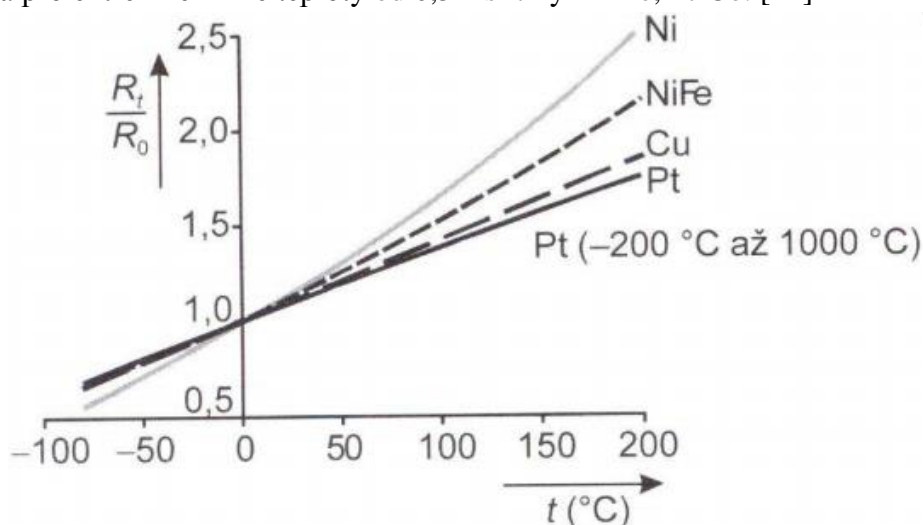
kde R_0 – odpor čidla je při teplotě 0 °C

Poměr odporů čidla je jeden z dalších základních parametrů odporových snímačů. Tento poměr se značí písmenem W dle následujícího vztahu:

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \quad (12)$$

kde R_{100} – odpor při teplotě 100 °C
 R_0 – odpor při teplotě 0 °C .

Pro větší rozsahy teplot již lineární vztah použít nelze. Mezi nejrozšířenější materiály, které se používají pro výrobu odporových kovových senzorů, se řadí platina, nikl, Balco (Ni-Fe), měď, molybden a pro extrémně nízké teploty od $0,5\text{K}$ slitiny Rh-Fe, Pt-Co. [11]



Obr. 4 Teplotní závislost odporových kovových snímačů [3]



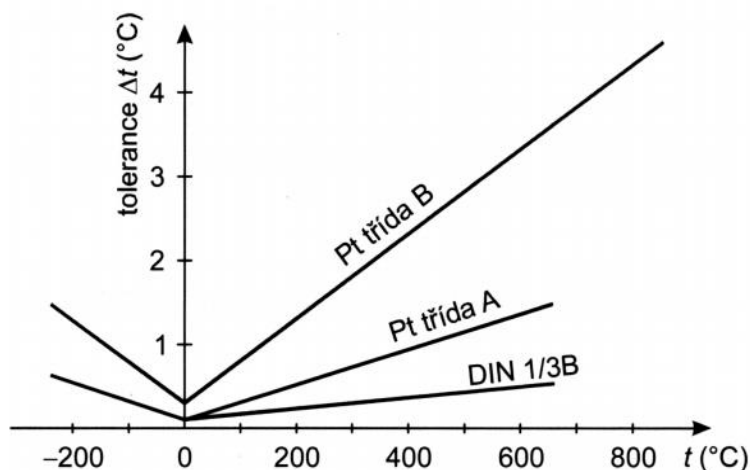
Obr. 5 Odporové snímače teploty s jímkou[12]

Platinové odporové snímače

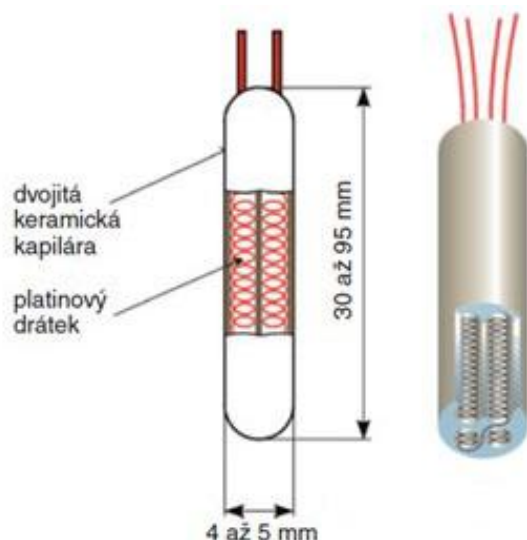
Platina se vyznačuje chemickou netečností, časovou stálostí a vysokou teplotou tání. Poměr elektrického odporu činí $W_{100}=1,385$. Pro metrologické účely jsou nároky na čistotu platiny vyšší (čistota 99,999%). Čistota se vyhodnocuje poměrem odporů při bodě tání galia a trojném bodu vody. Platinové měřicí odpory se podle norem IEC (International Electrotechnical Commission) dělí do dvou tolerančních tříd [3]:

- Třída A je stanovena pro rozsah teploty od -200 °C do 650 °C
Přesnost třídy: $\Delta t = \pm(0,150 + 0,002 * |t|)\text{ [°C]}$
- Třída B pro rozsah teploty od -200 °C do 850 °C
Přesnost třídy: $\Delta t = \pm(0,300 + 0,005 * |t|)\text{ [°C]}$

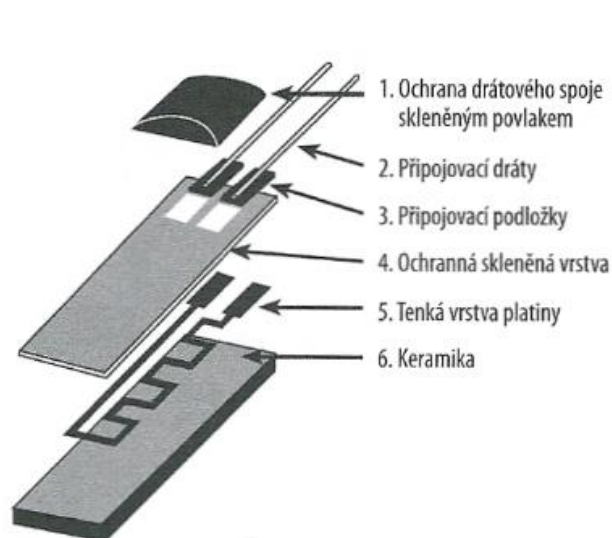
Kromě výše uvedených teplotních rozsahů se dále vyrábějí vysokoteplotní snímače až do teploty 1100 °C . Dlouhodobá stabilita u platinových snímačů je kolem $0,05\%/1000\text{h}$. Snímače vyráběné z platiny mají standardní hodnotu odporu $R_0 = 100\text{ }\Omega$, nicméně tu jsou ještě další možnosti, které mají následující parametry 50, 200, 500, 1000 a 2000 Ω . [11]



Obr. 6 Dovolené tolerance průmyslových Pt měřicích odporů dle IEC 751 [3]



Obr. 7 Drátkové platinové čidlo [13]



Obr. 8 Vrstvové platinové čidlo [13]

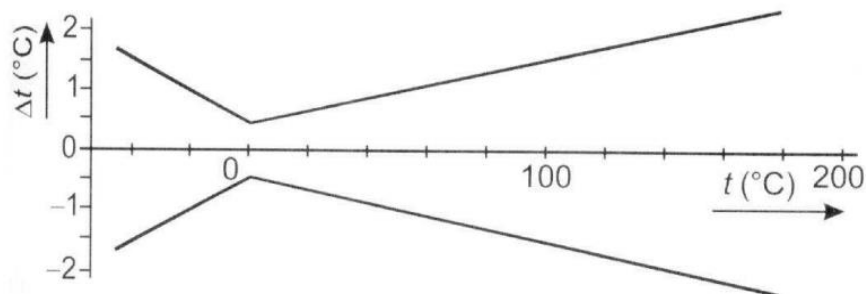
Niklové odporové snímače

Niklová čidla se vyrábějí tenkovrstvou technologií. Jejich výhoda je velká citlivost, rychlá odezva a malé rozměry. Nevýhodou je ovšem omezený teplotní rozsah a vůči platině značná nelinearita, horší dlouhodobá stabilita a odolnost vůči působení prostředí.

Dovolené tolerance odporu Ni čidla dle DIN 43760 [3]:

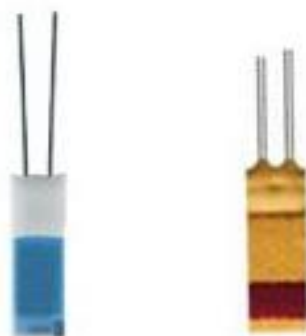
$$\Delta t = \pm(0,4 + 0,007 * |t|) \text{ pro } > 0^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = \pm(0,4 + 0,028 * |t|) \text{ pro } < 0^\circ\text{C}$$



Obr. 9 Tolerance Ni měřicího odporu [3]

Pt100 Ni1000



Obr. 10 Porovnání platinového a niklového čidla [14]

Tabulka 1: Porovnání platinových a niklových čidel s ohledem k toleranci a teplotám [14]

Typ	Popis	Tolerance		Max. teplota [°C]
		A	B	
Pt100	Platinové čidlo 100Ω/0°C	0,15+0,002t	0,30+0,005t	-70..+600
Pt1000	Platinové čidlo 1000Ω/0°C	0,15+0,002t	0,30+0,005t	-70..+600
Ni100/6180	Niklové čidlo 100Ω/0°C	0,20+0,035t	0,40+0,007t	-60..+250
Ni1000/5000	Niklové čidlo 1000Ω/0°C	0,20+0,0035t	0,40+0,007t	-60..+250

Měděné odporové snímače

Měď má využití v rozsahu teplot od -200 °C do +200 °C. Pro závislost odporu měděného čidla na teplotě lze v rozsahu teplot od -50 °C do +150 °C použít lineární vztah (11).

Kvůli malé rezistivitě (6krát menší než u platiny) a snadné oxidaci mědi se měděné snímače teploty běžně nevyrábějí. Výhodné použití teplotní závislosti mědi je např. přímé měření teploty měděného vinutí elektrických strojů prostřednictvím měření odporu vinutí. [10]

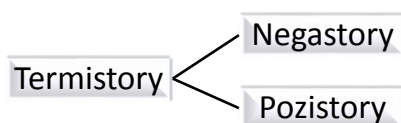
2.1.2 Polovodičové odporové senzory

Stejně jako kovové odporové senzory, využívají polovodičové odporové senzory stejného principu založený na teplotní závislosti odporu. Dominantní závislostí u polovodičových senzorů je koncentrace nosičů náboje n na teplotě dle vztahu [3]:

$$n = e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} \quad (13)$$

- kde
- n – počet elektronů v jednotkovém objemu
 - e – elementární náboj
 - ΔE – šířka mezery mezi energetickými hladinami
 - k – Boltzmanova konstanta
 - T – teploty soustavy na počátku a konci předávání tepla

Polovodičové odporové senzory tedy lze rozdělit na:



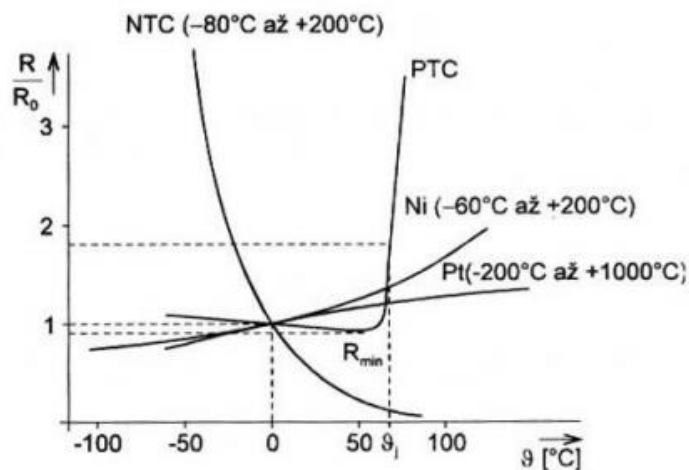
Monokrystalické odporové senzory

Termistory

Jedná se o teplotně závislé odpory, které jsou zhotovené z polovodičových feroelektrických keramických materiálů. Jejich výhodou je velká teplotní citlivost, jednoduchý převod odporu na elektrické napětí nebo proud, malé rozměry a možnost přímého měření odporu termistoru na větší vzdálenosti. Nevýhodou je jejich nelineární charakteristika.

Dále se dají podle struktury dělit na amorfnní a polykrystalické. Termistory se vyrábějí z materiálu, které mají buď velký záporný teplotní součinitel odporu (negastor neboli NTC termistor) nebo velký kladný teplotní součinitel odporu (pozistor neboli PTC termistor).

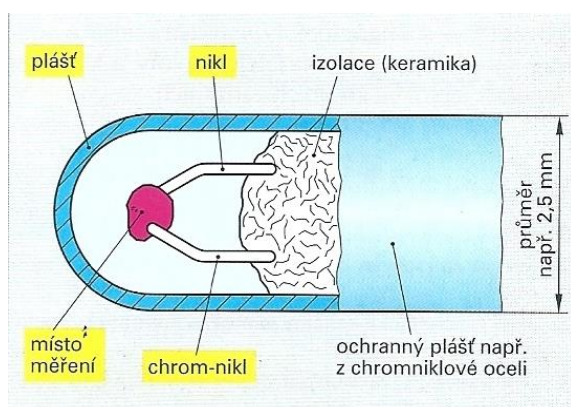
Zde je znázorněna závislost odporu negastoru a pozistoru v porovnání s teplotní závislostí kovových odporových senzorů platiny a niklu [3]:



Obr. 11 Porovnání teplotních závislostí NTC a PTC s odporovými senzory [3]

$\frac{R}{R_0}$ – poměr celkového odporu materiálu a odporu materiálu při 0 °C

θ – teplota v °C



Obr. 12 Zapouzdřený termočlánek v sondě [15]



Obr. 13 Druhy termistorů [16]

Negastory (NTC termistory)

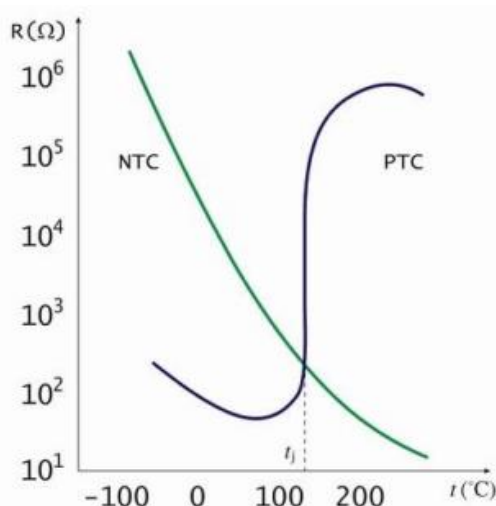
Negastory jsou vyráběny práškovou technologií z kysličníků kovů, jako je kysličník niklu, chromu, mědi, kobaltu, železa, manganu a titanu. Senzory, které jsou vylišované, jsou zpevňovány slinováním za vysokých teplot. Běžné teplotní rozsahy negastorů jsou od -50 °C do +150 °C, ale vyrábějí se i negastory s extrémními rozsahy v oblasti nízkých teplot od +4,2 °C do vysokých teplot až 1000 °C. [11]

Pozistory (PTC termistory)

Pozistory se vyrábějí z polykrystalické feroelektrické keramiky jako je například titaničitan barnatý (BaTiO3). Odpor pozistoru se stoupající teplotou nejprve mírně klesá, ale jakmile

dosáhne teplota určitého bodu tzv. Curierovi teploty, dochází u pozistoru ke strmému nárůstu rezistivity materiálu. Po dosažení teploty o několik řádů, začne odpor rezistoru opět mírně klesat. Dále se také vyrábějí pozistory, které jsou dopovány křemíkem, což má za následek, že jejich pracovní charakteristika se stane částečně lineární.

Pozistory se v elektrických obvodech využívají jako tepelné ochrany, omezovače proudu, teplotní regulace, aj. [11]

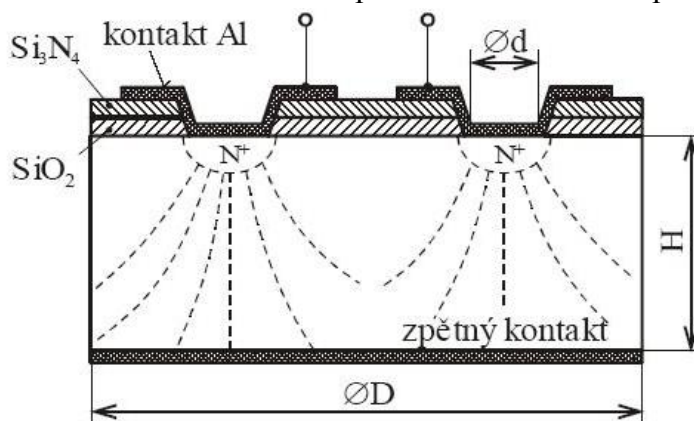


Obr. 14 Porovnání charakteristik PTC a NTC [17]

Monokrystalické Si senzory

Senzor je založen na nevlastním polovodiči typu N, což znamená s dominantní elektronovou vodivostí. Tyto senzory jsou vyráběny pro rozsah teplot od -50°C do $+150^{\circ}\text{C}$. Teplotní závislost v uvedeném rozsahu je dána teplotní závislostí pohyblivosti nosičů. Podobně jako u kovů dojde při zvyšující se teplotě, vlivem rozptylu nosičů náboje na mřížce polovodiče, ke zmenšování pohyblivosti těchto nosičů a rezistivita polovodiče narůstá.

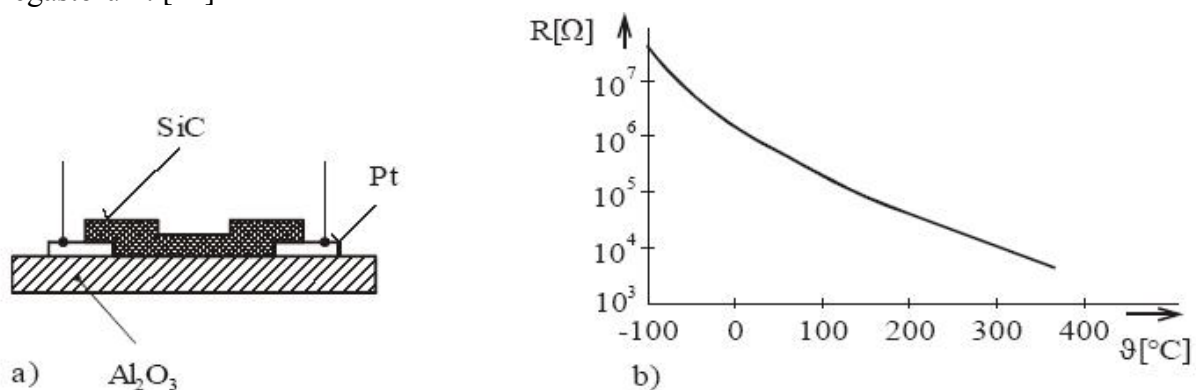
Symetrické uspořádání monokrystalického senzoru teploty umožňuje využití tzv. odporu šíření v prostoru kruhového kontaktu. Tímto uspořádáním dojde v daném prostoru k výrazné nehomogenitě intenzity elektrického pole, tedy ke vzniku značné hustoty proudu. Další výhodou symetrického uspořádání je, že odpor senzoru je dán dotační koncentrací a geometrií kontaktů a nezávisí na ostatních rozměrech a na polaritě kontaktního napětí. [11]



Obr. 15 Symetrické uspořádání monokrystalického Si senzoru [18]

Senzor SiC

Tento typ senzoru se vyrábí tenkovrstvou technologií vysokofrekvenčním napařováním na substrát Al_2O_3 . Rozsah teplot je od $-100\text{ }^\circ\text{C}$ do $+450\text{ }^\circ\text{C}$. Jejich charakteristika odpovídá negatorům. [11]



Obr. 16 Senzor SiC (a – struktura; b – charakteristika) [18]

2.1.3 Monolitické PN senzory teploty

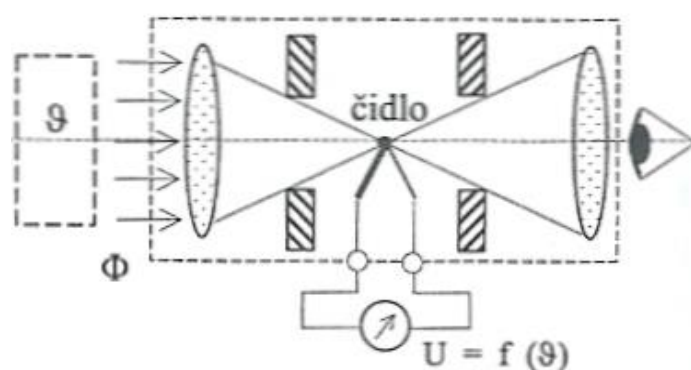
Senzory tohoto typu jsou založeny na principu teplotní závislosti napětí PN přechodu v propustném směru. Teplotní rozsah se pohybuje od $-55\text{ }^\circ\text{C}$ do $+150\text{ }^\circ\text{C}$. Nejistota měření je v rozsahu 0,6 % až 2 %. [11]

2.2 Bezdotykové senzory

2.2.1 Pyrometry

Senzory tohoto typu měří povrchovou teplotu tělesa na základě vysílaného elektromagnetického záření tělesem. Přijímací detektor záření přijímá rozsah vlnové délky od $0,4\mu\text{m}$ do $25\mu\text{m}$ a to se rovná rozsahu teplot od -40°C do $10\,000^\circ\text{C}$. Pyrometry se dělí podle použitého principu interakce fotonů. [13]

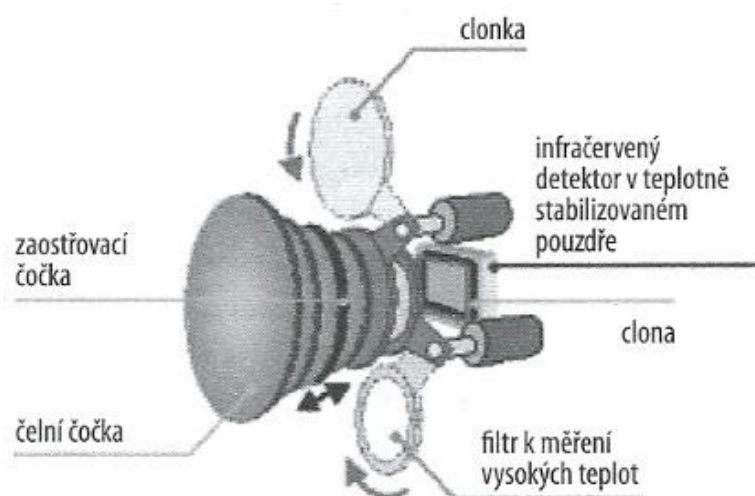
Příkladem je úhrný pyrometr, který vyhodnocuje záření v celém rozsahu vlnových délek. Jedná se o optickou soustavu, ve které se záření soustředí na měřicí spoj speciálního termočlánku, takže vznikající termoelektrické napětí odpovídá energii záření, která na těleso dopadá. To se rovná teplotě měřeného tělesa. Termočlánek dokáže detekovat záření o výkonu 10^{-8} W . [15]



Obr. 17 Úhrný pyrometr [15]

2.2.2 Termovizní systémy

Princip termovizních systémů je založen na rozložení informací o měřeném objektu prostředí na jednotlivé elementární plošky, kde je výchozím zobrazením tepelný obraz neboli termogram. Existují dva druhy infradetektorů. Fotonové mění radiační tok na elektrický signál a tepelné, ve kterých vyvolává změnu teploty a následně změnu odporu radiační tok. Používající rozlišení je 320×240 bodů. Termovizní systémy teplotu nejen změří, ale zároveň zobrazí teplotní rozložení nebo zdroje tepla. [15]



Obr. 18 Kamera s maticovým detektorem [15]

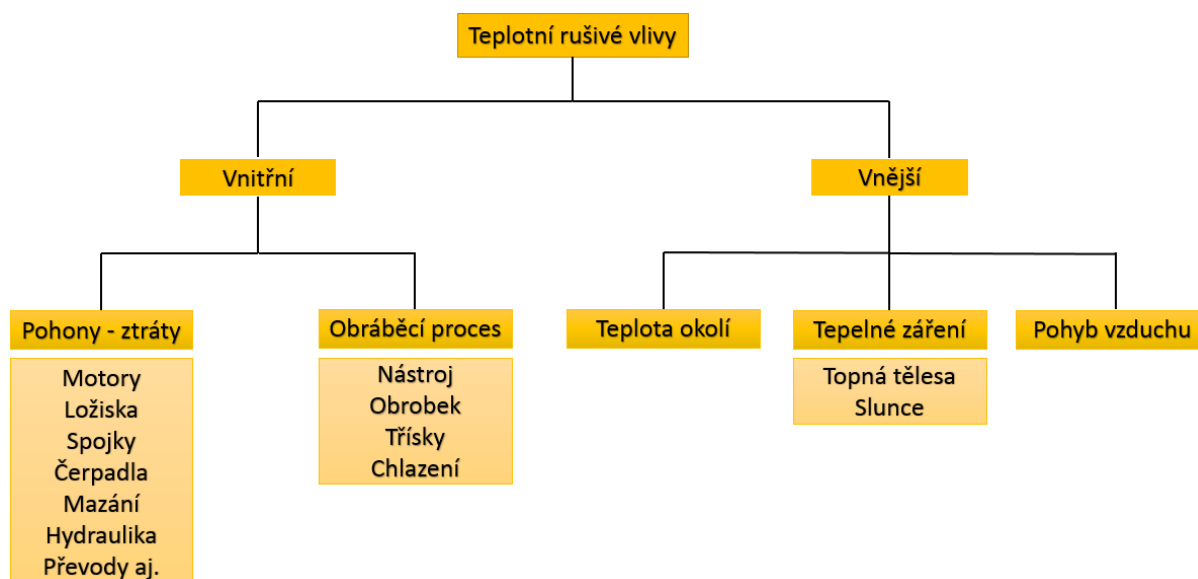
3 Tepelná charakteristika u obráběcích strojů

3.1 Vnější rušivé vlivy

Vnější rušivé vlivy jsou zdroje tepla v okolí, nevznikají vlastním provozem daného stroje. Jedná se o sluneční záření nebo teplotu okolního prostředí. Jsou taktéž ovlivňovány topením v místnosti, ročním obdobím nebo také generovaným teplem při provozu výrobních i nevýrobních strojů a zařízení. Přenos tepla u této skupiny je způsobován převážně zářením (radiací) a prouděním (konvekci). Důležitá kritéria pro tepelné deformace jsou změny teploty nebo samotné gradienty. Jedná se o změny v čase, kdy náhlé otevření vrat v zimním období způsobí obráběcímu stroji teplotní šok, či o prostorové gradienty, kde jsou rozdílné teploty v různé výšce nad podlahou, nebo rozdílné teploty ve stejné výšce v různých místech. [19]

3.2 Vnitřní rušivé vlivy

Vnitřní rušivé vlivy jsou způsobovány ztrátami pohonných motorů a obráběcím procesem samotným. Toto teplo lze navíc dělit na teplo od řezného procesu a na teplo vytvářené nejrůznějšími agregáty jako jsou čerpadla, servomotory či pohony vřeten. U této skupiny probíhá přestup tepla jeho vedením (kondukcí). Vnitřní zdroje tepla vznikají přímo uvnitř konstrukce stroje, jako jsou lože a další nosné součásti a následně se v konstrukci šíří [19]. V tomto termickém systému mohou s různým podílem jednotlivých článků působit všechny uvedené rušivé vlivy současně. Je zřejmé, že významnou část vnitřních zdrojů tepla, vytváří samotný proces obrábění. Při procesu odebrání třísky, se vytvořená mechanická energie mění převážně v teplo. Toto teplo, které je vytvářeno v úzké oblasti řezné hrany, dosahuje vysokých teplot, které se mezi kontaktními plochami mezi nástrojem, třískou a plochou řezu mohou rovnat až 1200°C. Následující vysoké teploty mají velice nepříznivé účinky na intenzitu opotřebení nástrojů, nepříznivě ovlivňují přesnost obrábění a kvalitu obrobené plochy. V povrchových vrstvách obrobených ploch mohou vyvolávat zbytkové pnutí a strukturální přeměny. [20]



Obr. 19 Rozdělení vnitřních a vnějších teplotních vlivů [20]

3.3 Rozložení teplot v obráběcím procesu

Charakteristika řezného procesu se dělí na práci deformační a práci vnitřního a vnějšího tření. Celková práce řezání se tedy rovná součtu parciálních prací deformačních a třecích. [20]

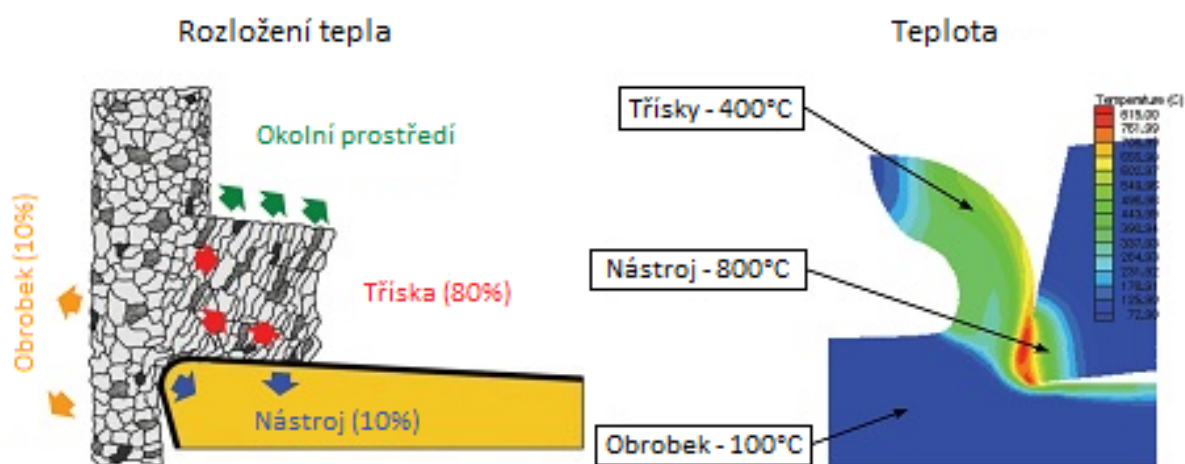
$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \quad (17)$$

- kde
- A – celková práce řezání
 - A_1 – práce deformační (až 80%)
 - A_2 – práce tření na čele (~ 5%)
 - A_3 – práce tření na hřbetě (~ 5%)
 - A_4 – práce pružných deformací (~ 2 až 10 %)

Při obrábění se celková práce řezání přemění na teplo Q , kde platí vztah $Q = A$. Odvod tepla se od částice k částici v místě vzniku třísky děje vedením (kondukcí), kde také dochází k pružnému vlnění. Mezi okolním prostředím a obráběným tělesem, jako je například obrobek a řezná kapalina, se odvod tepla děje prouděním (konvekcí). A poslední varianta přechodu tepla, kdy vznikají elektromagnetické vlny v prostředí, se nazývá sálání (radiace), jak již bylo vysvětleno v předchozích kapitolách.[20]

Následující balance popisuje tepelné a procentuální rozložení teploty při řezném procesu:

Q_t (42 ÷ 95) %	- třískou
Q_o (5 ÷ 45) %	- obrobkem
Q_n (1,5 ÷ 5) %	- nástrojem
Q_p (1 ÷ 8) %	- prostředím
Q_v (50 ÷ 70) %	- vrtáním

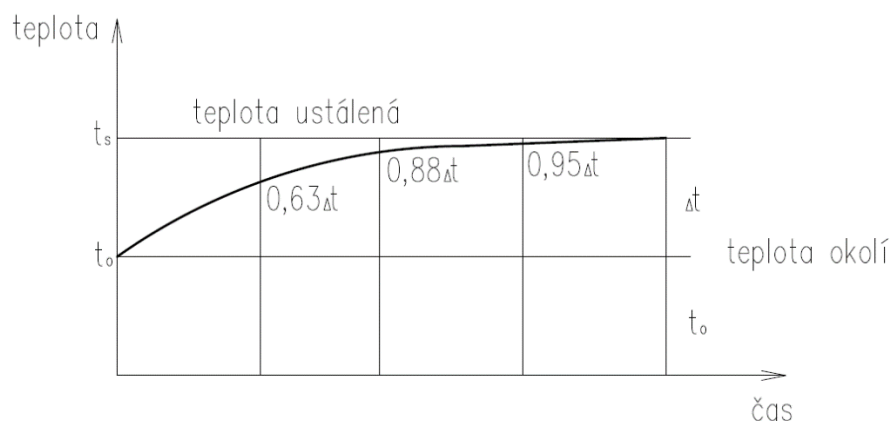


Obr. 20 Tepelné faktory [21]

Kvůli takto vysokým bilancím je kladen velký důraz na plynulý odvod třísek, které obsahují největší část vzniklého tepla. U vrtání je nutno říci, že je veškeré teplo předáváno do obrobku.

Všechny tyto teplotní vlivy způsobují oteplování obráběcího stroje, který v určitém bodu dosáhne ustálené teploty t_s . Největší nárůst teploty je v první fázi pracovního chodu, jak

můžeme vidět na Obr. 21 Obr. 21 Průběh zvyšování teploty stroje [20], kde je také zřejmé, že oteplovací proces není lineární. [20]



Obr. 21 Průběh zvyšování teploty stroje [20]

3.4 Tepelná dilatace při obráběcím procesu

Tepelná stabilita u obráběcího stroje je při jeho provozu velice důležitá pro udržení požadované přesnosti obráběné součásti v dané toleranci. Tepelná roztažnost je jeden z nejvýznamnějších dějů, který má za následek změnu rozměrů a tvarů obráběné součásti. Mnoho součástí je tolerovaných v řádech jednotek tisícín, a proto je nutné, udržet obráběcí stroje ve správné provozní teplotě, aby nedocházelo k nepřesnostem při obrábění, díky měnícímu se teplotnímu gradientu napříč celým strojem. Další z důležitých vlivů, který představuje dominantní hodnotu, je tepelná stabilita konstrukce stroje. Tohoto vlivu si můžeme častěji všimnout u obráběcích strojů větších rozměrů, kde i malý teplotní gradient znamená velkou geometrickou odchylku na obráběné součásti. [7]

U součásti s mnohonásobně větší délkou než šířkou, se dá při malé tepelné deformaci zjistit průměrná hodnota součinitele lineární teplotní roztažnosti. Je definována počáteční délka součásti L_i a její změna vlivem rozdílných teplot ΔT o hodnotu ΔL . Následující předpoklad se dá pro součinitel definovat tímto vztahem [7]:

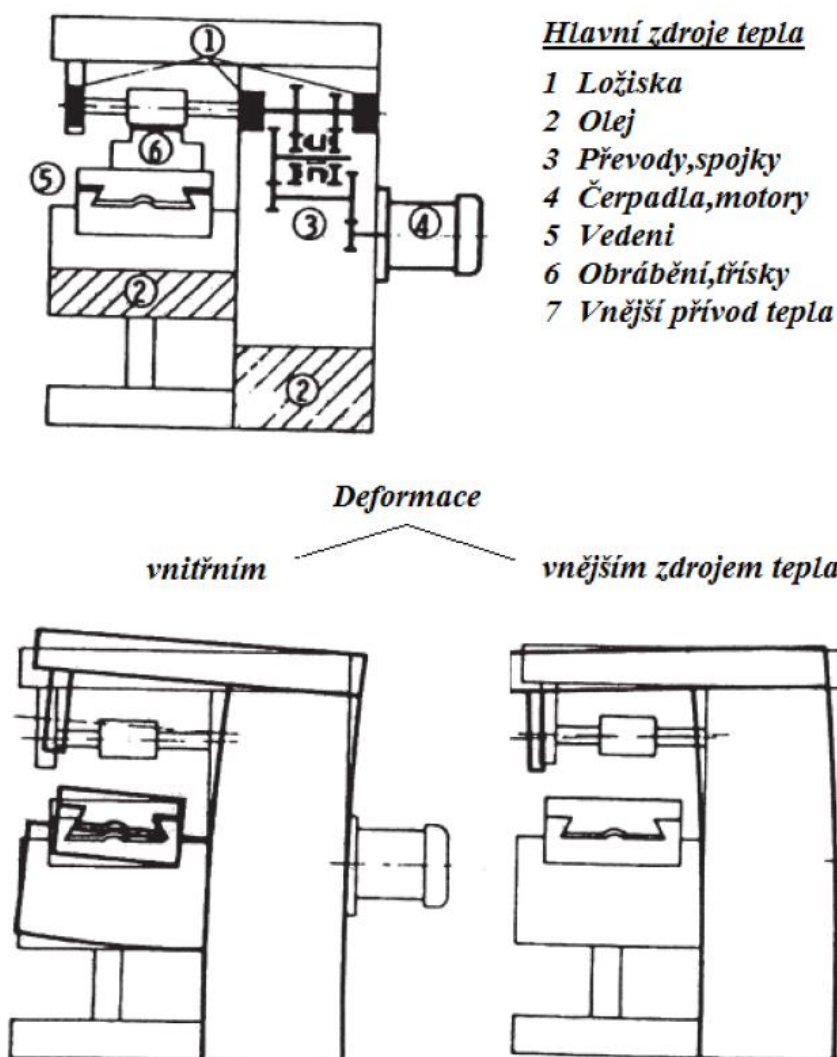
$$\alpha \equiv \frac{\Delta L / L_i}{\Delta T} \quad (14)$$

Experiment dokazuje, že při malých změnách teploty je tento součinitel možné považovat za konstantu a při vyšších teplotních rozdílech je funkcí teploty. Po úpravě této rovnice, dostaneme následující tvary [7]:

$$\Delta L = \alpha * L_i * \Delta T \quad (15)$$

$$L_f - L_i = \alpha * L_i * (T_f - T_i) \quad (16)$$

kde L_f [mm] – konečná délka
 L_i [mm] – počáteční délka
 T_f [°C] – konečná teplota
 T_i [°C] – počáteční teplota
 α [(°C)⁻¹] – lineární součinitel tepelné roztažnosti



Obr. 22 Zdroje tepelných chyb působící na horizontální frézku [7]

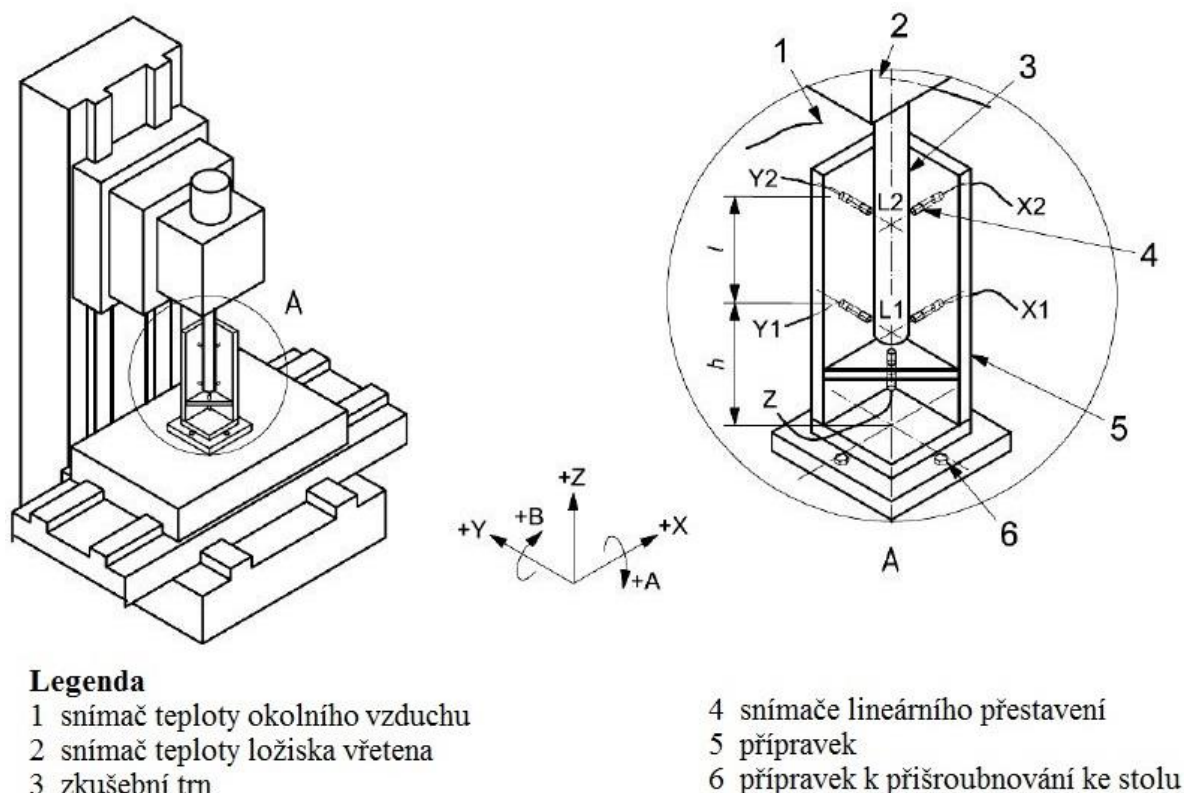
3.5 Způsoby měření tepelných dilatací

V dnešní době existuje mnoho způsobů, jak měřit posunutí a orientaci součástí obráběcích strojů. Ne všechny jsou vhodné pro měření odchylek způsobené změnami teplotních gradientů, a proto výběr vhodného měřicího systému závisí na zdroji teplotně-deformačních změn. Vlivy prostředí, vedou obecně k pomalým změnám teplot, ale u velkých obráběcích center vedou k nezanedbatelným změnám geometrie. Výměny způsobené vnitřními zdroji tepla jsou naopak intenzivnější, méně předvídatelné a mohou se měnit rychleji než ty, které způsobuje životní prostředí. Vnitřní vlivy, kterými se rozumí např. teplo vytvářené ložisky a vodícími dráhami, vede k lokální deformaci struktury obráběcího stroje, a to dále vede k posunům, které částečně mění objemový výkon. [7]

3.5.1 Měřicí metoda ETVE podle ISO normy 230-3

Z důvodu jednotného přístupu pro vyhodnocování teplotních dilatací, byly vydány některé normy, které pomáhají k lepšímu porovnání a analýze strojů. Příkladem této normy je zkouška, která stanovuje teplotní chyby způsobené změnami teploty prostředí, ve kterém je stroj

umístěný. Zároveň také chyby vznikající při rotaci vřetena a deformace, které vznikají při pohybu lineárních os. Podle ISO normy 230-3 se jedná se o analýzu ETVE. Při této zkoušce byl stroj nezatížený řezným procesem, popřípadě pracoval při dokončovacích podmínkách. Pro měření deformací jsou nejčastěji používány kapacitní nebo indukční bezkontaktní snímače. Pro měření prodloužení částí nosné konstrukce stroje nebo pro stanovení odchylek způsobených pohybem lineárních os je možné využít laserové měřicí zařízení. Nevýhodou tohoto měření je, že při delším měření jsou ovlivněny i samotné měřicí zařízení. [7]



Obr. 23 Měření teplotních deformací vřetena [22]

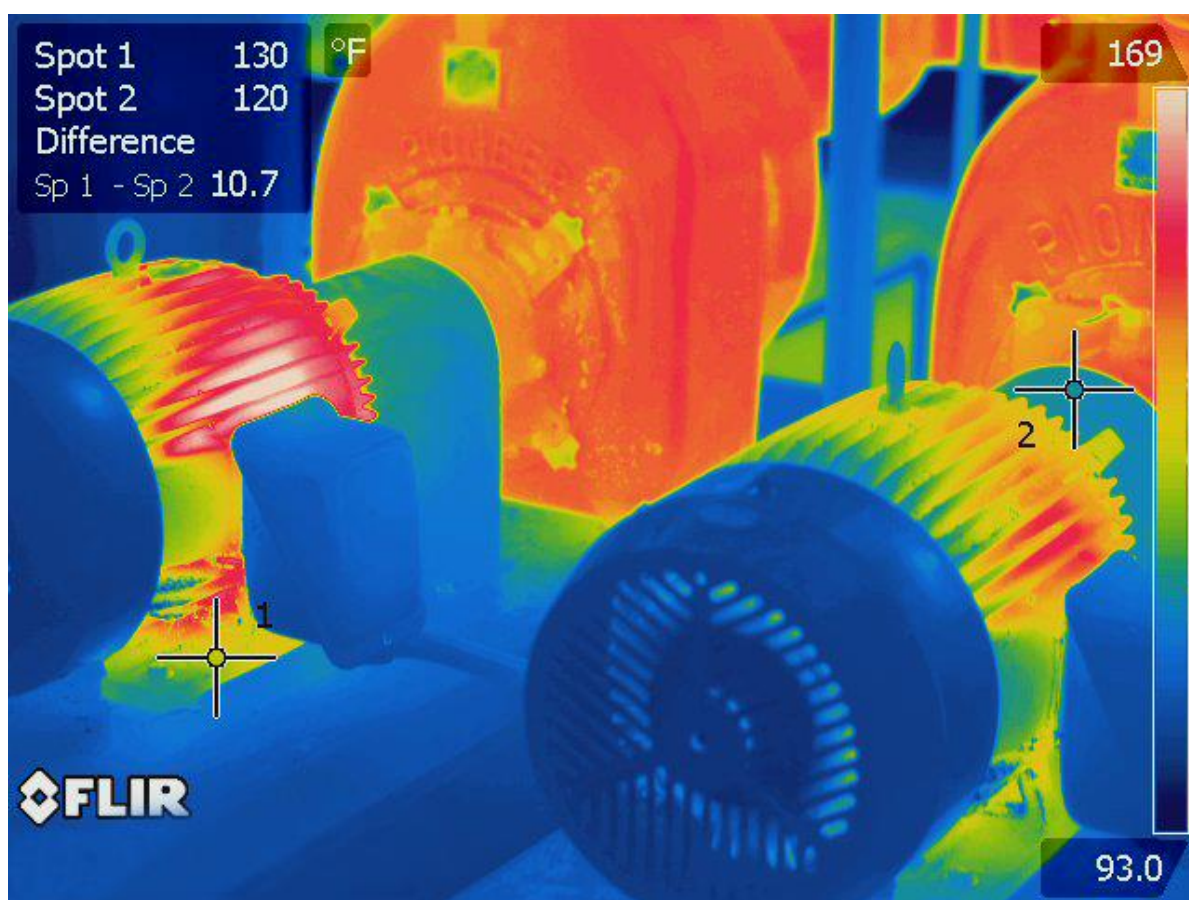
Do vřetena se upne zkušební trn a pomocí pěti čidel, které jsou namontovány na měřicím přípravku, jsou měřeny teploty a posunutí. Snímač posuvu X1 a X2 se paralelně namontuje na jedné straně testovací tyče, zatímco Y1 a Y2 jsou upevněny na druhé straně. Úhel mezi X1, Y1 a X2, Y2 je 90°. Při měření je možné získat axiální tepelnou chybu (směr osy Z) a dvě radiální tepelné chyby (směr osy X a Y). [23]

Vhodné místa měření jsou takové, které jsou co nejbližší koncovým bodům dráhy a také ne dále než 2m od sebe. Do každého místa měření, musí být umístěn senzor z jiného místa měření, díky čemuž je zahrnuta chyba vzniklá při reversaci lineárního pohybu. Je předpokládáno, že chyby vzniklé při reverzaci nejsou pro měření významné. [22]

Všechny struktury mají tepelnou rezonanční frekvenci. Je-li obráběcí stroj zatížen změnami okolní teploty, může být libovolná frekvence předpovězena metodou krokové odezvy. [1]

3.5.2 Bezkontaktní měřicí zařízení

Pro měření rozložení teplotních polí v systému obráběcího stroje je možné použít bezkontaktní měřicí zařízení, pracující na principu infračerveného záření. Velká nevýhoda tohoto zařízení je velmi nízká přesnost měření, která je závislá na přesném stanovení emisivity povrchu zkoumaného tělesa, vlhkosti a teploty okolí. Proto se tyto zařízení používají pouze k orientační identifikaci zdrojů tepla na stroji nebo ke stanovení přibližné teploty řezného procesu, který není možný snímat kontaktními snímači. Pro dokonalejší stanovení teplot v určitých uzlech obráběcího stroje je potřebné využít kontaktní čidla s vysokou přesností, kterými můžeme zaznamenávat změny teplot i v průběhu dlouhých časových úseků. [7]



Obr. 24 Stanovení teplotních polí pomocí infračervené kamery [24]

4 Kompenzace tepelných chyb

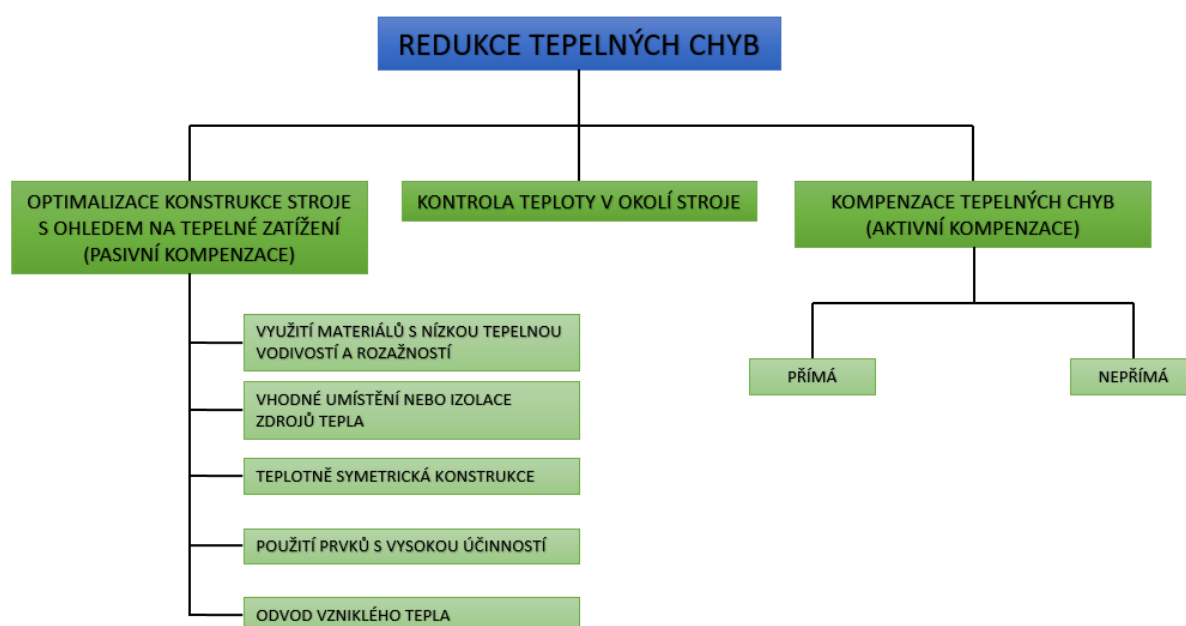
Změny v teplotních gradientech stroje vedou k nežádoucím deformačním chybám, které způsobují nepřesnosti na finálních součástech. Existuje hned několik možných přístupů, které mají za cíl zredukovat vliv teploty na přesnost obrábění. Ovšem je důležité zmínit fakt, že v reálných soustavách se teplotní deformaci nikdy úplně odstranit nepodaří, lze jí pouze zredukovat.

Deformace rámu obráběcího stroje je nežádoucí, protože přes nosnou strukturu stroje se tepelná chyba přenáší na nástroj. Proto je snahou vytvořit teplotně symetrickou konstrukci rámu. Jedná se o takové převedení, kdy v případě deformací vlivem tepla dochází ke změně rozměrů rámu, ale nemění se geometrická přesnost jeho částí. Tato konstrukce je uplatnitelná jen u některých typů strojů. Většinou dochází k minimalizaci teplotních chyb jen v jedné obráběcí ose. Rám by měl být též navrhnutý a optimalizovaný tak, aby vznikali jen lineární složky teplotních dilatací, protože úhlové složky jsou pro kompenzaci výrazně komplikovanější. Často bývá rám zkonstruovaný tak, aby mohl být profukovaný vzduchem, což přispívá ke zrovnoměnění teplotních polí. Důležitý je též okamžitý odvod třísek mimo pracovní prostor stroje. [7]

Další možností zohlednit teplotní deformace v předvýrobní fázi je izolování tepelných zdrojů, případně využití nekonvenčních materiálů s nízkou teplotní roztažností a tepelnou vodivostí. Mezi takové materiály řadíme například beton nebo žulu. Z důvodu nízké tepelné vodivosti a vysoké tepelné kapacity jsou tyto materiály odolné vůči skokovým změnám teploty.

Pozitivně ovlivnit teplotní poměry na obráběcím stroji je možné taktéž kontrolou teploty v pohonných agregátech, které jsou robustním zdrojem tepla.

Při výrobě přesných součástí je někdy kladený požadavek na stálou teplotu okolí, tedy teplot ve výrobních prostorech. Tento proces má za cíl snížit negativní dopad měnících se podmínek volné, případně nucené konvekce v okolí stroje. Haly musí být klimatizované na konstantní hodnotu teploty ve všech směrech. [7]



Obr. 25 Redukce tepelných chyb[7]

4.1 Pasivní kompenzace

Pasivní kompenzace teplotních chyb během obráběcího procesu je způsob, jak se dá předejít vzniku velkých teplotních gradientů. Dá se ovlivnit několika možnými přístupy. Jeden z nejdůležitějších faktorů je volba vhodného materiálu před samotnou výrobou obráběcího stroje. Další přístupy zahrnují vhodnou konstrukci stroje, správné chlazení, odvod vzniklého tepla (třískou) nebo vhodné umístění či izolace samotných zdrojů tepla. [25]

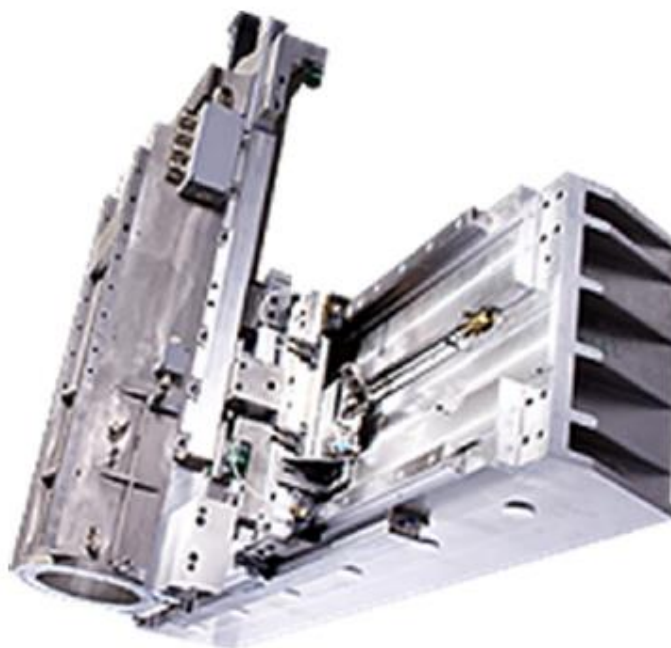
4.1.1 Materiály

Výběr materiálu a konstrukční uspořádání závisí na cílené aplikaci obráběcího stroje. Je třeba vzít v úvahu vlastnosti procesů, které musí stroj provádět. Materiály, které dokáží kompenzovat tepelné posuny, jsou omezeny mechanickými vlastnostmi každého z nich. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří nízká tepelná roztažnost, vysoká tuhost a tlumení. Co se týče rozmanitosti dostupných materiálů, tak v obráběcích strojích a součástech můžeme vidět kov, kámen, keramiku, polymer-beton, porézní a vyztužené kompozitní materiály. Často se také používají hybridní materiály spolu s kombinací dalších materiálů. [26]

Ocel, litina a kovové materiály

Ocelové, litinové a kovové materiály jsou stále nejčastěji používanými materiály v obráběcích strojích. Kovové struktury se také používají pro různé hybridní a kombinované materiálové a konstrukční řešení. Kovové komponenty jsou přinejmenším potřebné pro mechanická rozhraní, spoje, vedení a ložiska.

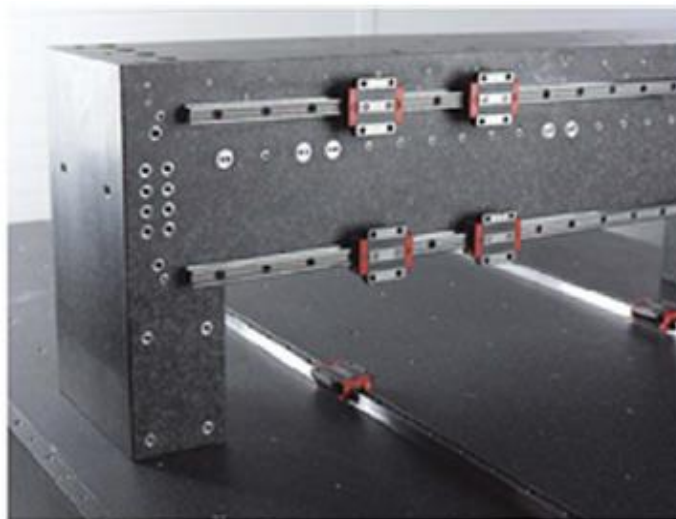
U velmi přesných strojů a metrologických rámců jsou vyžadovány materiály s minimální tepelnou roztažností. Často používaný Invar (slitiny Fe-Ni s typicky asi 64% Fe a 36% Ni, až 1% Mn, Si nebo uhlíkem a až 5% Co) poskytuje velmi nízký nebo dokonce negativní koeficient tepelné roztažnosti. [26]



Obr. 26 Křížový skluz z hliníkové slitiny [26]

Přírodní kámen a keramika

Žula je krystalický tvrdý kámen složený z křemene, slídy a živce. Jeho vlastnosti se liší v závislosti na původu materiálu. Je používán převážně na rámy a stoly obráběcích strojů pro svou nízkou tepelnou vodivost, vysokou tepelnou stabilitu a nízkou tepelnou roztažnost. [26]



Obr. 27 Lineární vedení pouzder v žulovém rámu [26]

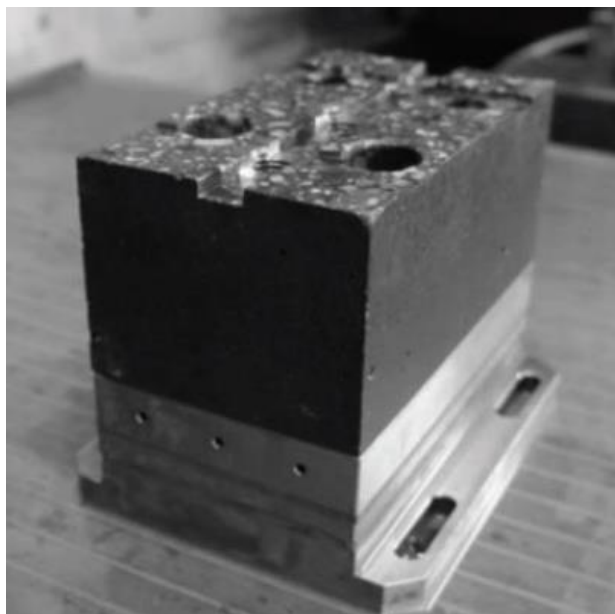
Keramika se skládá z anorganických materiálů převážně tvořené kovy a metaloidy s iontovou, ale i kovalentní vazbou a různými komplexními krystalovými strukturami. Má křehké vlastnosti a nízkou tepelnou roztažnost. Tlumení vibrací keramiky je velmi špatné, ovšem lze dosáhnout nízké tepelné deformace a lehké, ale tuhé konstrukce. [26]

V praxi se používají nejvíce tyto materiály:

- Polykrystalická oxidová keramika - téměř nulová teplotní roztažnost
- Hliníková keramika - malá tepelná deformace
- Keramika z karbidu křemíku - nižší tepelná roztažnost oproti bílé keramice
- Neporézní Li-Al-křemičitý oxid skelné keramiky
- Jemnozrnný keramický materiál (NEXCERA)

Polymer-beton

Polymerový beton vykazuje vynikající vlastnosti pro tlumení vibrací a je rozměrově a tepelně stabilní. Ve srovnání s ocelí a litinou poskytuje minerální odlitek při vyšší tepelné kapacitě nižší koeficient tepelné roztažnosti a mnohem nižší tepelnou vodivost. Minerální odlitky umožňují přímou integraci chladících okruhů během lití. Skládá se obvykle z pryskyřice jako polymerní matrice a anorganických agregátů různých velikostí. Vlastnosti materiálu mohou být dále ovlivněny změnou objemového podílu kameniva a objemovým poměrem pryskyřice. [27]



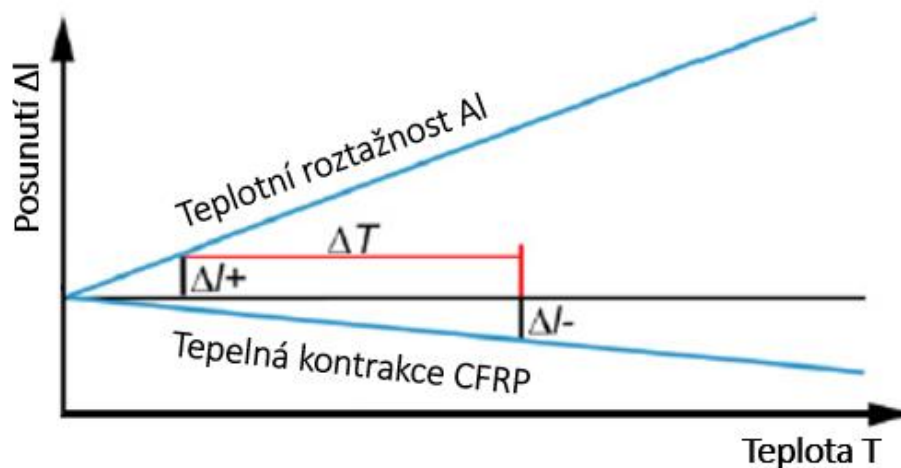
Obr. 28 Vzorek polymer-betonu [27]

Kompozitní materiály

Tepelné posuny vyplývající z kladného koeficientu lineární roztažnosti strojních součástí, jako je například hliníková skříň vřetena, mohou být kompenzovány generováním tepelného namáhání v opačném směru s použitím materiálu, mající záporný koeficient lineární roztažnosti. Pro tento účel jsou vhodné materiály jako například speciální plasty vyztužené uhlíkovými vlákny (CFRP) viz Obr. 29. K dispozici je široká škála vláknitých materiálů se zápornými koeficienty lineární roztažnosti.

Je třeba vzít v úvahu i samotnou anizotropii těchto materiálů. Požadovaná materiálová vlastnost záporné tepelné roztažnosti existuje pouze ve směru vlákna. Například u kompozitních materiálů s vyztuženými aramidovými vlákny, je ve směru vlákna tepelná roztažnost záporná, ale napříč vlákny kladná.

Pro úspěšnou aplikaci musí platit, že tyto materiály budou dlouhodobě splňovat požadavky na komponenty obráběcích strojů, tj. vysokou tuhost, tvarovou přesnost a stabilitu, spojitelnost s komponentami sestavy stroje apod. [1]

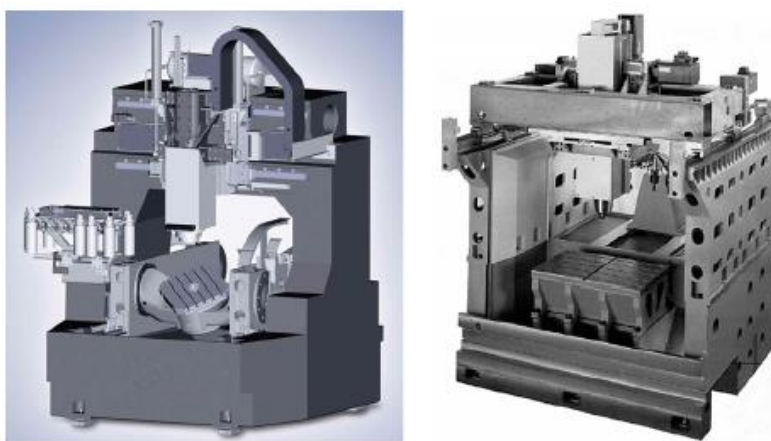


Obr. 29 Porovnání teplotních posunů pokročilými materiály [1]

4.1.2 Konstrukce

Hlavním úkolem strojních konstrukcí je zajištění geometrické konfigurace prvků stroje i při statickém, dynamickém a tepelném zatížení, jakož i absorpce, vedení sil a momentů. Ve většině případů se dá zajistit teplotně symetrická konstrukce rámu, což znamená, že v případě deformace vlivem ohřátí dochází ke změně rozměrů rámu, ale geometrická přesnost se mění minimálně. Některé konstrukční řešení rámu dokážou teplotní deformace i eliminovat.[28] Pokud jde o přesnost obráběného obrobku, měl by také rám stroje absorbovat jakékoli rušivé účinky. Lehká konstrukce je žádoucí pro pohyblivé komponenty a vysoké tlumení a stabilita by měla být zajištěna základnou stroje. Dobrý design vede k rovnoměrnému rozložení zatížení. V ideálním případě by úroveň napětí při zatížení měla být stejná pro všechny použité materiály.

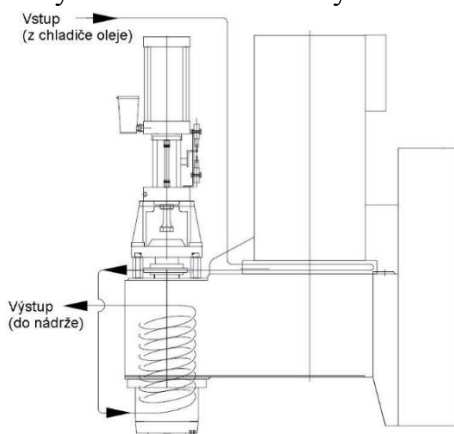
Ovšem i tato metoda má určitou nevýhodu. Tepelně symetrické mohou být navrženy pouze některé osy, ale vždy musí být jedna aktivně kompenzována. Při návrhu samotné konstrukce také nelze docílit, aby byly všechny tepelně symetrické. Na Obr. 30 můžeme vidět moderní konstrukci obráběcích center včetně lůžek, sloupů, stolů, hlavních vřeten, spojovacích vedení a ložisek. [26]



Obr. 30 Moderní konstrukce obráběcích center [26]

4.1.3 Chlazení vřetena

Příklad chlazení pouzdra vřetena a příruby motoru pro zajištění správného provozu, zamezení roztažnosti vlivem tepla a prodloužení provozní doby ložisek. Chlazení je prováděno olejem, který je čerpán z chladicí jednotky cirkulací kolem daných funkčních částí.



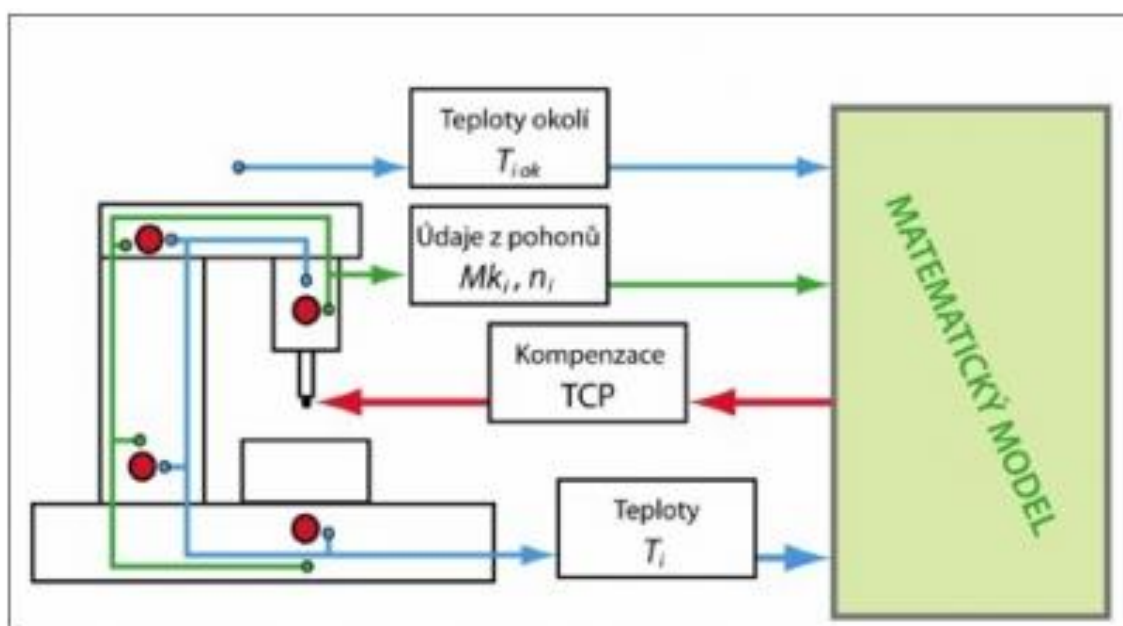
Obr. 31 Model chlazení vřetena a příruby motoru [29]

4.2 Aktivní kompenzace

Aktivní kompenzace je proces, kde je tepelná chyba redukována nastavením polohy nástroje a obrobku, za pomoci existujících os stroje. Výhodou této metody je, že nepotřebuje žádný drahý hardware, jako jsou vyspělé materiály a může být implementován v jakékoli fázi projektování nebo výstavby obráběcích strojů.

Existují dva druhy aktivní kompenzace tepelných chyb při obrábění, které lze rozdělit na přímou a nepřímou kompenzaci. [1]

- U přímé kompenzace jsou tepelné posuvy měřeny periodicky a přerušovaně, například nástroje vzhledem k pevné měřicí sondě. Naměřené posuvy jsou následně pomocí korekce zkorigovány, což vede ke zpřesnění ve všech jednotlivých osách. Velkou nevýhodou této metody je, že se musí daný stroj odstavovat z provozu.
- U nepřímé kompenzace se vytvoří matematický model, závislý na měření pomocných proměnných (teploty ve vybraných místech), kterým jsou následně určovány teplotní deformace. Tyto teplotní deformace jsou poté kompenzovány řídicím systémem. V této době se již můžeme spolehnout na několik takových systémů pro tvorbu výše zmíněného matematického modelu. Jako příklad lze uvést tyto metody:
 - metoda konečných prvků (FEM)
 - metoda konečných diferencí (FDM)
 - metoda konečných diferenčních prvků (FDEM)
 - vícenásobná lineární regrese (MLR)
 - přenosová funkce (TF)
 - umělé neuronové sítě (ANN)
 - fuzzy logika



Obr. 32 Tvorba matematického modelu u nepřímé kompenzace

4.2.1 Metoda konečných prvků (FEM)

Metoda konečných prvků slouží k simulaci pro vytvoření fyzikálního modelu napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla, atd... Metoda je založená na Lagrangeově principu, který říká, že je těleso v rovnováze, pokud je celková potenciální energie deformace soustavy minimální. Pro vytvoření modelového řešení využívá numerické rovnice, založené na diferenciálních rovnicích ve formě matice:

$$C * T + H * T = Q \quad (17)$$

kde C – matice tepelné kapacity
 H – matice tepelné vodivosti
 T – teplotní vektor diskretních uzlů
 Q – vektor tepelného zatížení

Dané řešení diferenciálních rovnic se na elementárních oblastech aproximuje jednoduchými funkcemi jako jsou lineární či kvadratické polynomy. Pro hledané hodnoty potenciálu v uzlových bodech se převede výchozí parciální diferenciální rovnice na soustavu lineárních algebraických rovnic. Nejprve se tedy vymezí analyzovaná oblast, poté se aproximují hledané rovnice, sestaví se maticové rovnice a následně vyřeší. Díky rychlému rozvoji výpočetní techniky v dnešní době, se pro tyto numerické výpočty a celkovou analýzu tepelných charakteristik používá komerční výpočetní software, jako je například ANSYS, ABAQUS nebo Marc & Mentatec a další...

Tato technika zajišťuje, aby měli inženýři komplexní znalosti o tepelných charakteristikách včetně ještě před jeho stavbou a ušetřili tak čas i energii na analytické výpočty a experimentální zkoušky. Pokud jsou správně definovány okrajové podmínky (koeficienty konvekce tepla) a tepelné zatížení (tvorba tepla), mohou být zaručeny velice přesné numerické řešení. [25]

Tato metoda je schopna vytvořit velice přesný matematický model, který je ovšem omezen vstupními hodnotami a okrajovými podmínkami. Ten je třeba převést zpět do systému obráběcího stroje a následně díky zjištěným kritickým tepelným oblastem zkorrigovat TCP.

4.2.2 Metoda konečných diferencí (FDM)

Metoda konečných diferencí je další běžně používanou metodou numerické analýzy pro určení tepelných charakteristik včetně. Tuto metodu lze popsat na výzkumu, který provedl Bossmann.

Jeho model prokazuje rozložení výkonu vřetenového systému a ukazuje dráhu proudění vstupního výkonu a směry přenosu tepla mezi různými částmi včetně. Na základě výpočtu a přenosu tepla byl vyvinut konečný teplotní model a následně rozložen na 56 prvků. Tyto prvky měly pouze jeden stupeň volnosti (průměrná teplota). Pro každý prvek bylo možné předpovědět teplotu pomocí diferenciální rovnice energie (18). Poté bylo možné programovat pomocí MATLABU ustálené a přechodné teplotní pole včetně. Předpokládalo se, že teplo bylo přeneseno z jednoho prvku do sousedního prostřednictvím vedení a z povrchu do chladicí tekutiny přes proudění. Aby bylo možné ověřit správnost modelu, byly provedeny zkoušky při různých otáčkách včetně.

$$\dot{q}_{\text{vnější teplo}} + \dot{q}_{\text{vnitřní teplo}} + \dot{q}_{\text{přední teplo}} + \dot{q}_{\text{zadní teplo}} + \dot{q}_{\text{teplo uzlu}} = c_t \frac{dT}{dt} \quad (18)$$

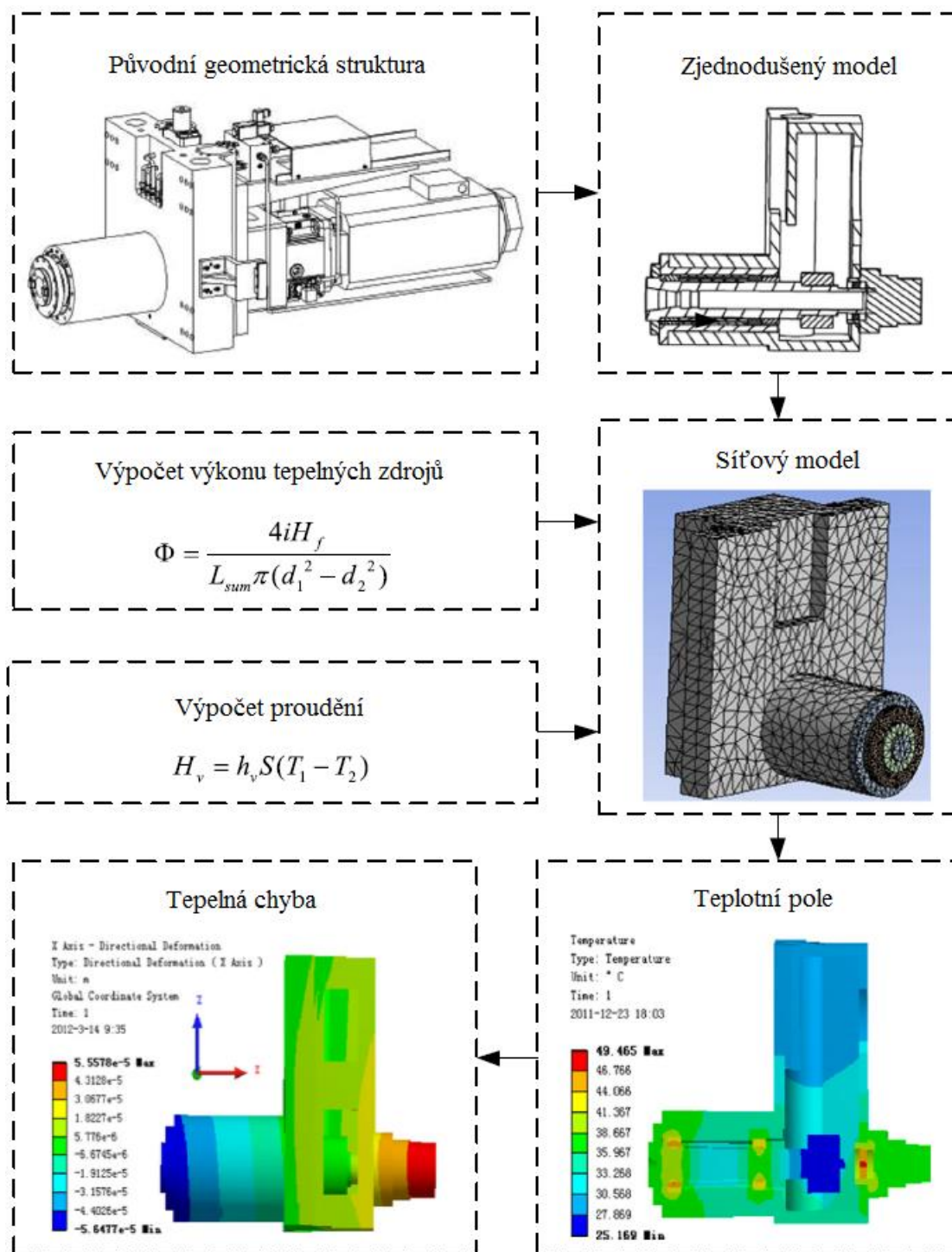
4.2.3 Metoda konečných prvků a diferencí (FDEM)

Základní myšlenkou této metody je spojit výhody FDM a FEM. Jedná se o odstupňovaný algoritmus, který je speciálně vyvinut pro výpočet přechodného termomechanického chování mechanických systémů, jako jsou obráběcí stroje. Problém řešení je tedy rozdělen do dvou kroků.

V prvním kroku se pomocí FDM velmi efektivně vypočítá teplotní rozložení teploty. Jsou-li nezbytné přechodové simulace, tak výsledkem v jednotlivých časových bodech simulačního času, je rozložení teploty daného systému. Tyto časové body mohou být buď předurčeny operátorem nebo mohou být vybrány na základě matematických pravidel softwarovým balíčkem (např. Solver e.g.). Rozložení teploty v ustáleném stavu lze také snadno vypočítat pomocí stejného systému, který se používá pro simulace přechodových jevů s nastavením všech tepelných toků na nulu. Kvůli různým okrajovým podmínkám působícím na uzly FDM se hodnoty prvků matice mění s velkým rozpětím. V takových případech je pro efektivní řešení vhodné použít speciálně vyvinuté implicitní numerické integrační metody s variabilním časovým krokem.

Ve druhém kroku se po výpočtu přechodného teplotního rozložení mechanického systému využívá pro řešení tepelně indukovaných deformací metoda konečných prvků. FEM je často používána pro řešení problémů s deformačními tělesy. V tomto případě ovšem existuje ještě jeden důležitý důvod, proč si tuto metodu zvolit. Každé rozložení teploty má za následek vytvoření rovnic ve vektoru zatížení. Všechny vektory pravé strany mohou být shromážděny do matice na pravé straně a společně řešeny. Řešení takového systému rovnic vyžaduje jen velmi málo dodatečného času. Proto může být úspora času výpočtu enormní.

Tato metoda má tu výhodu, že pro kompenzační model obráběcího stroje, jsou vzhledem k souřadnému systému obrobků, důležité pouze posuny na TCP. Takový malý systém lineárních rovnic umožňuje FDEM použít pro výpočet hodnot tepelné kompenzace v reálném čase. [25]



Obr. 33 Obecný proces numerických simulací [25]

4.2.4 Regresní analýza

Další velice používanou metodou je regresivní analýza. Tato metoda je schopna zkoumat vztah mezi kvantitativní proměnnou odezvy a jednou nebo více kvantitativními vysvětlujícími proměnnými. Zde jsou uvedeny tři běžně používané typy [25]:

- Multivariační regresivní analýza (MRA)
- Autoregresní model
- Regresní analýza projekce pro modelování tepelných chyb (PPR)

Multivariační regresní analýza (MRA)

U této metody nemůže být přesný teplotní model dosažen s jedinou teplotou, protože existuje vždy více možností pracovních podmínek. Jako například když existuje více než jedna proměnná tedy různé teploty na celém vřetenovém systému, rychlost vřeten, atd...

Zápis rovnice multivariačního regresního modelu tepelné chyby vypadá následovně [25]:

$$Y = \beta X + \varepsilon \quad (19)$$

kde Y - tepelná chyba vřeten v určitém směru
 X - matice vstupních dat (teplota, rychlost vřeten, atd.)
 β - koeficient modelu regrese
 ε - chyba

Autoregresní model

Tato metoda je další z velice oblíbených metod, která je populární hlavně pro modelování časových řad. Je to proto, že se tepelná chyba vřeten mění průběžně s časem, dokud nedosáhne ustáleného stavu. Bylo zjištěno, že tepelná chyba v určitém okamžiku závisí na tepelné chybě v posledním momentu a na otáčkách vřeten.

Na základě autoregresní metody byly vyvinuty čtyři různé modely, a to model založený na teplotě, teplotě/rychlosti, posunu/rychlosti a model hybridních proměnných. Výsledky testů a modelování ukázaly, že model založený na posunu měl nejlepší přesnost. Přesnost při montáži by ale mohla být dále zlepšena, pokud byl použit model hybridních proměnných. [25]

Regresní metoda projekce (PPR)

Tato metoda je založená na metodě projekce (PP). Původním účelem bylo vybírat „zajímavé“ nízko-rozměrné projekce velkého rozměru. Slouží pro odhad hladkých funkcí několika proměnných z hlučných rozptýlených dat. Dále zlepšuje přesnost predikce tepelných chyb v soustavě počítačového číslicového řízení (CNC) v denní výrobě.

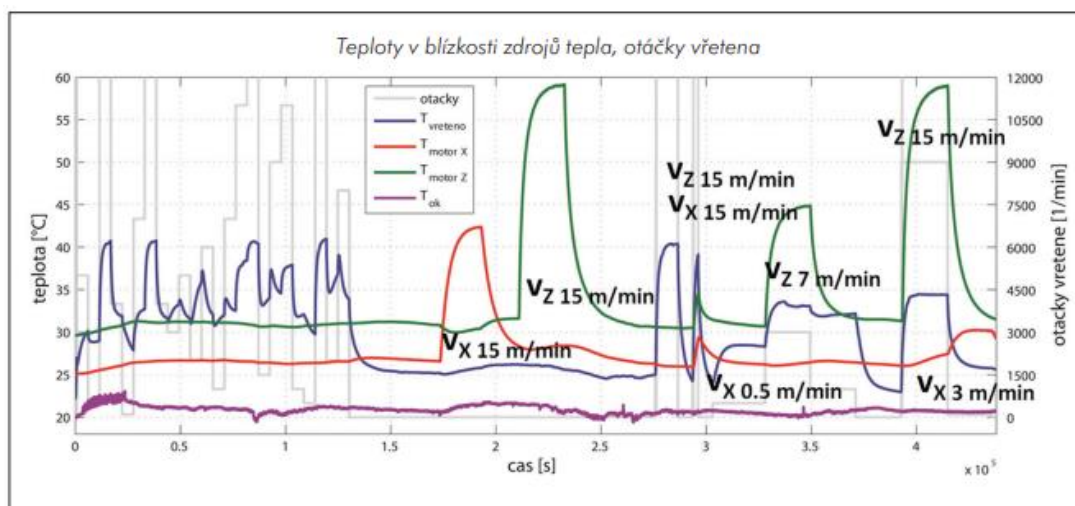
Byl vytvořen model tepelné chyby vřeten, založený na 15 teplotních proměnných. Výsledky zkoušek ukázaly, že zbytková chyba byla menší než 5 μ m. Dále byly provedeny experimenty řezání s ověřením účinnosti kompenzace tepelné chyby na základě tohoto modelu. V experimentu bylo obrobena 40 hřídelí a po kompenzaci byly chyby zmenšeny v průměru z 34 μ m na 5 μ m. [30]

4.2.5 Vícenásobná lineární regrese (MLR)

Tato teplotní kompenzace představuje velice levný způsob, jak minimalizovat teplotní deformace u obráběcích strojů. Ke stroji není nutné montovat přídavné senzory (např. dotykové sondy) a nevznikají zde ani další provozní náklady jako v případě aplikace chladících okruhů.

U této metody se určitým matematickým modelem predikují hodnoty korekce v dané ose a určitém čase, které jsou superponovány k požadované poloze určité osy. Hodnoty lze získat lineární (vícenásobnou) regresivní analýzou tzv. MLR (angl. multiple linear regression). Jedná se o jednoduchý matematický popis polynomické funkce. Běžné systémy tuto metodu standardně nabízejí, např. Siemens, Heidenhain.

Velká výhoda tohoto způsobu je v rychlosti získání kompenzačního algoritmu, díky MLR modelu sestaveného na základě empirických dat pouze z jednoho kalibračního měření pro zvolený pracovní režim. Bohužel však tento režim zcela neodpovídá realitě, která nastává při obrábění, protože zkouška probíhá bez obrábění a při konstantních otáčkách vřetena bez pohybu dalších pohybových os. Při obrábění totiž dochází ke vzniku teplotní deformace na špičce nástroje, která se mění v závislosti na proměnlivých otáčkách, aktuálních posuvových rychlostech v jednotlivých osách a výkonu samotného vřetena viz Obr. 34.



Obr. 34 Průběh otáček, posuvových rychlostí v ose X a Z a klíčových teplot v průběhu ověřovacího testu [31]

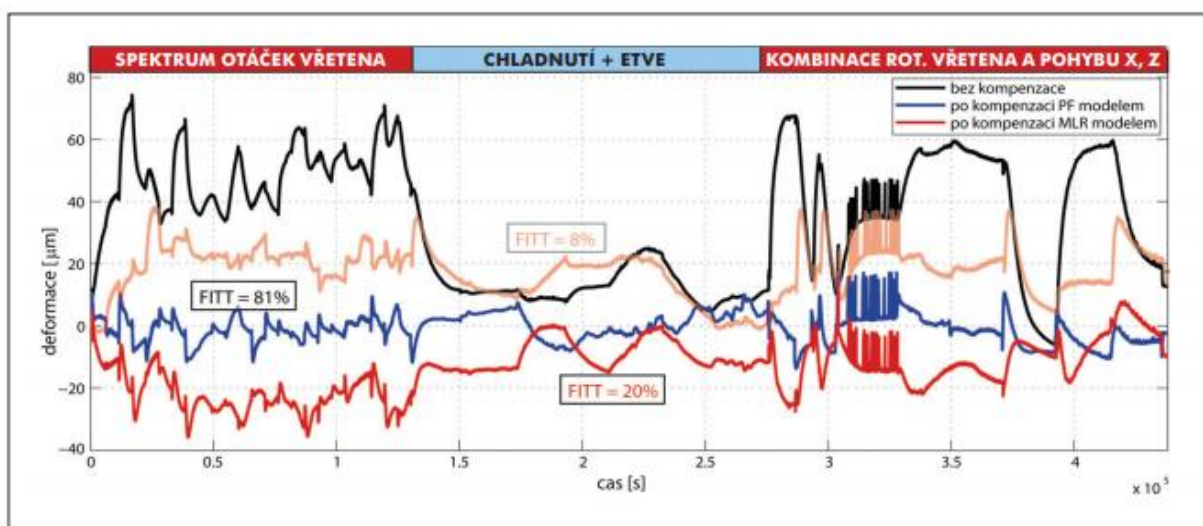
K získání MLR modelu sice není zapotřebí moc času, nicméně přesnost a spolehlivost odhadu teplotních odchylek je velice nízká. Tyto modely totiž nemají přístup ke všem místům, tedy tam, kde nejsou umístěny senzory teploty a také nerespektují principy vedení tepla. Z tohoto důvodu jsou vyvíjeny pokročilé SW teplotní kompenzace, které fungují na principu přenosových funkcí (PF). [31]

4.2.6 Přenosová funkce

Přenosová funkce popisuje vazbu mezi teplotou v místě A (buzení analogicky jako v případě dynamiky) a výchylkou v bodě B (špička nástroje), která je zapříčiněním roztažností materiálu. Tato metoda dynamické SW teplotní kompenzace též využívá teploty konstrukce jako vstupní hodnoty do výpočtu korekcí jako MLR modely, ovšem umístění teplotních senzorů je jednoznačné. Sensory je třeba umístit co nejblíže ke zdroji tepla, tedy ke špičce nástroje, kde chceme teplotní deformace popsat. V tomto případě lze také využít vstupních hodnot zadaných do systému stroje, jako jsou např. otáčky, zatížení vřetena nebo pohybových os, atd...).

Výhodou těchto PF modelů je, superponování a aproximování negativních vlivů, které ovlivňují výslednou teplotní chybu, čímž získáme komplexní teplotně-elastické chování stroje. Na Obr. 35 můžeme vidět výsledky porovnání kompenzačních metod: [31]

- Černá – bez kompenzace
- Červená – kompenzace založená na MLR modelu
- Modrá – kompenzace založená na modelu přenosových funkcí

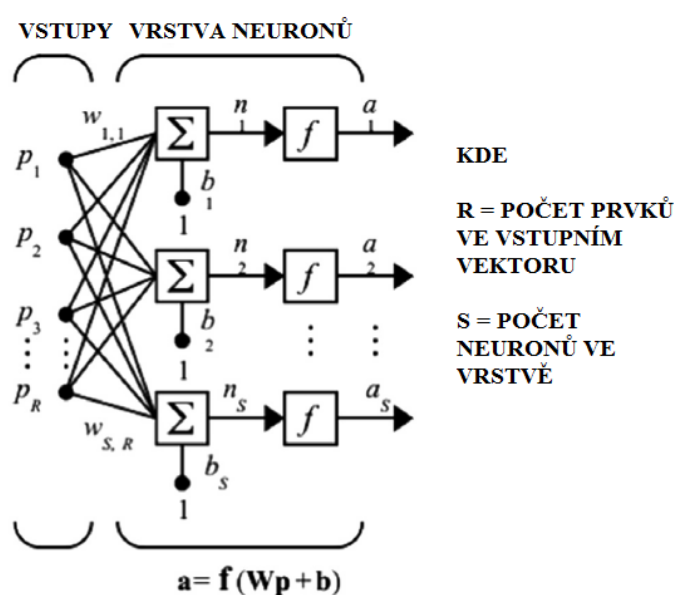


Obr. 35 Porovnání výsledků při principu PF a 2MLR modelů na stroji MMC1500 [31]

4.2.7 Neuronové sítě (NN)

Neuronová síť (NN) neboli umělá neuronová síť (ANN), je jednou z nejužitečnějších metod pro mapování vztahů mezi více proměnnými vstupy a výstupy. Vzhledem k tomu, že má dobrý výkon při tvorbě nelineárních funkcí, používá se v různých oblastech výzkumu. Při tvorbě modelu tepelné chyby založené na neuronové síti jsou zde teploty považovány za vstupy a tepelné chyby vřetena za výstupy. Struktura obecné jednovrstvé napájené sítě je znázorněna na Obr. 36, kde \mathbf{p} představuje vstupní vektor a \mathbf{a} představuje výstupní. Teprve po zapracování údajů je na základě naměřených dat neuronová síť schopna předpovídat tepelné chyby vřetena.

Na rozdíl od regresního modelu může být teplotní chyba vřetena ve více směrech modelována pouze jednou neuronovou sítí, protože má více výstupů. To má za následek významné snížení únavného úkolu modelování. [25]



Obr. 36 Struktura jednovrstvé neuronové sítě [25]

Existují další čtyři typy neuronových sítí, přičemž každá má své výhody a nevýhody. Jedná se o tyto sítě: [25]

- Neuronová síť se zpětným šířením sítě
- RBF síť
- Integrovaná rekurentní neuronovou síť
- Elmanova síť

5 Analýza vybrané části stroje

Tato část práce bude nejprve zaměřena na tepelné chování vřetena a ložisek obráběcího stroje při obráběcím procesu. Poté zde bude uvedeno několik výzkumů z praxe, kde se výrobci obráběcích strojů snaží tyto teplotní chyby na vřetenu a ložiskách kompenzovat.

5.1 Rozbor vyskytujících se tepelných deformací u vřetena

Jednou z nejhlavnějších součástí obráběcího stroje ovlivňující přesnost a produktivitu obrábění je právě vřeteno. Mechanický a tepelný proces uvnitř ložisek je propojen a teplo generované v ložiskách a motoru se přenáší přes vřetenové prvky, což způsobuje lineární a nelineární tepelnou roztažnost. Při zvyšující se rotaci roste i generovaná teplota na povrchu ložisek. K tomu dále proměnlivé zdroje tepla způsobují celkovou tepelnou roztažnost, která vytváří další tepelná zatížení. Nerovnoměrné rozložení teploty způsobuje elastickou tepelnou deformaci vřetenového hřídele, což má za následek geometrické a tvarové chyby obrobku. [32]

V tomto příkladu je teplo generované v ložiskových a tepelných kontaktních odporech určeno pouze ve stacionárním stavu. Rovněž množství tepla vznikajícího v ložisku, teploty a tepelného kontaktního odporu ložiska se považuje za jednotné pro všechny kuličky. Na druhé straně se nebere v úvahu změna viskozity maziva v důsledku změny teploty ložiska. S nárůstem teploty dochází k rozšíření ložiskových a vřetenových prvků, což způsobuje zvýšení kontaktního zatížení ložiska, čímž se zvyšuje generované teplo a mění se odpor tepelného kontaktu v závislosti na poloze kuličky. Změna rozměrů ložiskových prvků v důsledku tepelné roztažnosti se při analýze tepelného chování vřetena obráběcího stroje obvykle ignoruje. Ovšem všechny tyto parametry mohou významně ovlivnit přesnost analyzovaných výsledků. [32]

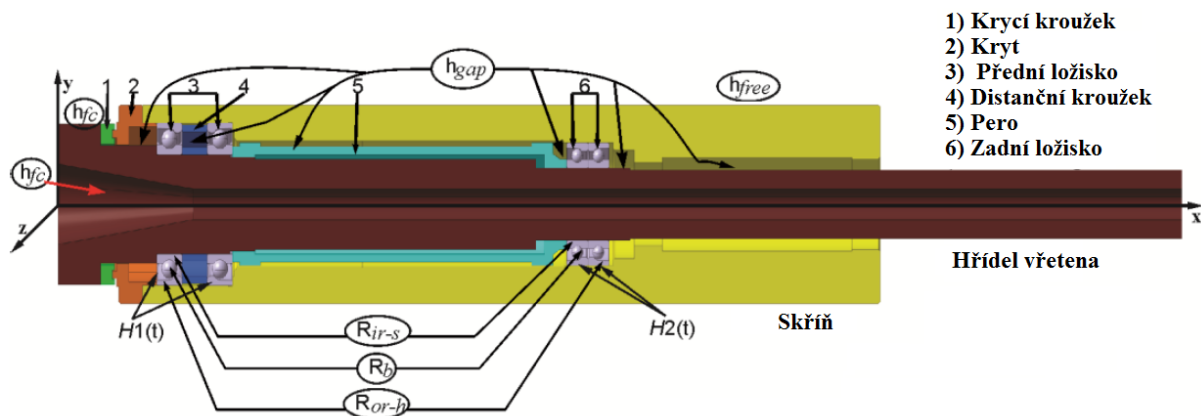
K určení vlivu nelineárních tepelných účinků na tepelné chování vřetena obráběcího stroje byl použit 3D termomechanický model. Na tepelném modelu byly použity proměnlivé zdroje tepla a součinitele prostupu tepla. Stejně tak se teplo vznikající na ložisku, jakož i odpor tepelného kontaktu analyzují v nestacionárním stavu. Na základě specifických teplot vřetena jsou stanoveny nové rozměry kuliček a drah. Poté se určí kontaktní úhly kontaktních sil, odpor tepelného kontaktu pro každou kuličku v důsledku tepelné roztažnosti. Proces se opakuje, dokud nedosáhne stavu stacionární teploty, protože jakékoli změny, které následují, jsou zanedbatelné. A nakonec za účelem stanovení účinnosti navrhovaného modelu, byla provedena experimentální měření vřetenových a ložiskových teplot za použití termočlánku, infračerveného teploměru a termokamery. [32]

5.1.1 Tepelná charakteristika

Hlavní zdroj tepla pro vysokorychlostní vřeteno znázorněné na Obr. 37 je generován ložisky H1(t) a H2(t). Podmínky přenosu tepla z vřetena a okrajové podmínky pro odvod tepla jsou: [32]

- konvekce mezi nosem vřetenového hřídele a okolním vzduchem (h_{fc}).
- proudění vzduchu v prstencové mezeře (h_{gap}) (např. mezi hřídelem vřetena a pouzdem, hřídelem vřetena a vnějším distančním kroužkem).
- vedení z kuliček na vnitřní a vnější oběžné dráhy (R_b).
- vedení mezi vnějším ložiskovým kroužkem a skříní (R_{or-h}).

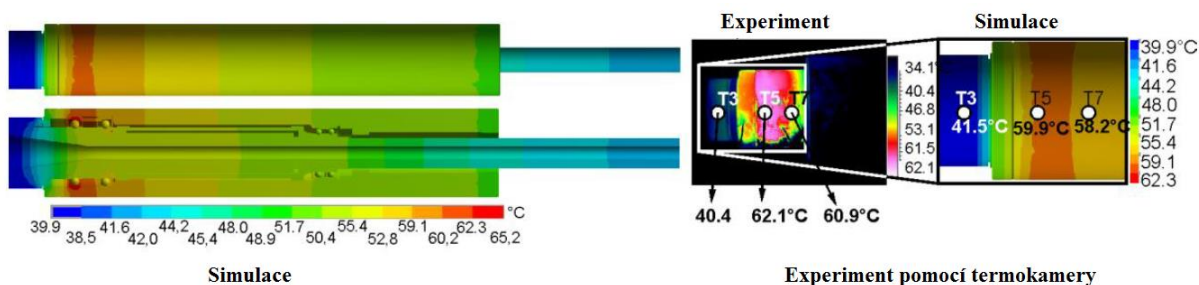
- vedení mezi vnitřním ložiskovým kroužkem a hřídelem vřetena (R_{ir-s}).
- volné proudění okolního vzduchu kolem stacionárních povrchů (h_{free}).



Obr. 37 Model vysokorychlostního vřetena

V procesu analýzy byly dále definovány následující hypotézy, které neovlivňují výsledky: [32]

- Model vřetena je osově symetrický a předpokládá rovnoměrnou vůli mezi vnějším kroužkem a pouzdrem po celém obvodu.
- Některé malé prvky například otvory, matice a další mikrostruktury, nejsou vzhledem k jejich minimálnímu vlivu na výsledky simulace uvažovány.
- Vzhledem k minimálnímu množství maziva není uvažován odpor tepelného toku v důsledku mazání mezi kuličkami a oběžnými drahami.
- Tepelné záření je zanedbáno, protože teplotní rozdíl během otáčení vřetena je malý.



Obr. 38 Teplotní rozložení vysokorychlostního vřetena při 9000 ot/min

5.1.2 Shrnutí experimentu tepelné analýzy vřetena

Na Obr. 38 můžeme vidět rozložení teploty vřetena pro rychlost otáčení 9000 ot/min a referenční teplotě 22 °C. Jak si můžeme všimnout, teploty kolem předních ložisek jsou vyšší než teploty ostatních vřetenových prvků a rozložení teplotního pole není pro vřeteno a pouzdro rovnoměrné. Zvýšené teploty ložiska je způsobeno třením kuliček a kroužků. Tím se teplo nahromaděné v ložiskách přenáší na vřeteno a skříň, přičemž větší část je uložena na skříni. [32]

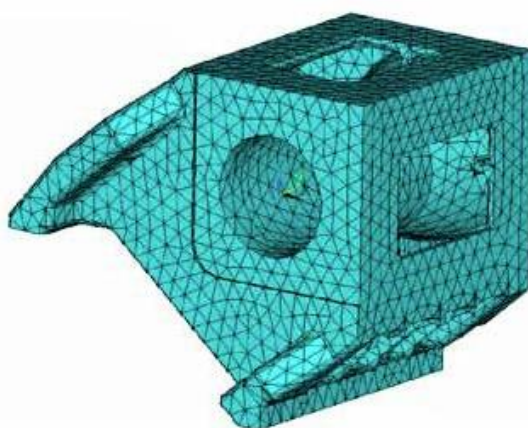
5.2 Korekce vřetena a ložisek při obráběcím procesu

Pokud chceme správně kompenzovat tepelné chyby vřetena, musíme nejprve vědět, o jaký typ stroje se jedná. Všechna vřetena totiž mají společné znaky (rotační pohyb, upínání, apod.), ale jejich konstrukce se liší. Teplotní deformace obsahují dvě složky, které je třeba kompenzovat. Jedná se o složku lineární a úhlovou. Kompenzace úhlové složky je podstatně náročnější proces než složky lineární. V prvních fázích procesu je pro nejvhodnější konstrukční návrh důležité analyzovat teplotně-mechanické chování jednotlivých komponent stroje jako celku. [33]

5.2.1 Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii (RCMT)

V RCMT se pro výpočtové analýzy teplotních polí a souvisejících teplotních deformací využívají a dále rozvíjejí postupy na základě metody konečných prvků. Modely struktur, sestavené na bázi konečných prvků, představují reálný systém, jehož výsledkem je rozložení teplot, tepelných toků a teplotních deformací v prostoru a čase. Je možné provádět virtuální experimenty a minimalizovat negativní dopady jednotlivých tepelných zdrojů. MKP modely dovolují předpovídat a optimalizovat teplotně-mechanické chování struktur a šetří čas i náklady při návrhu nového stroje.

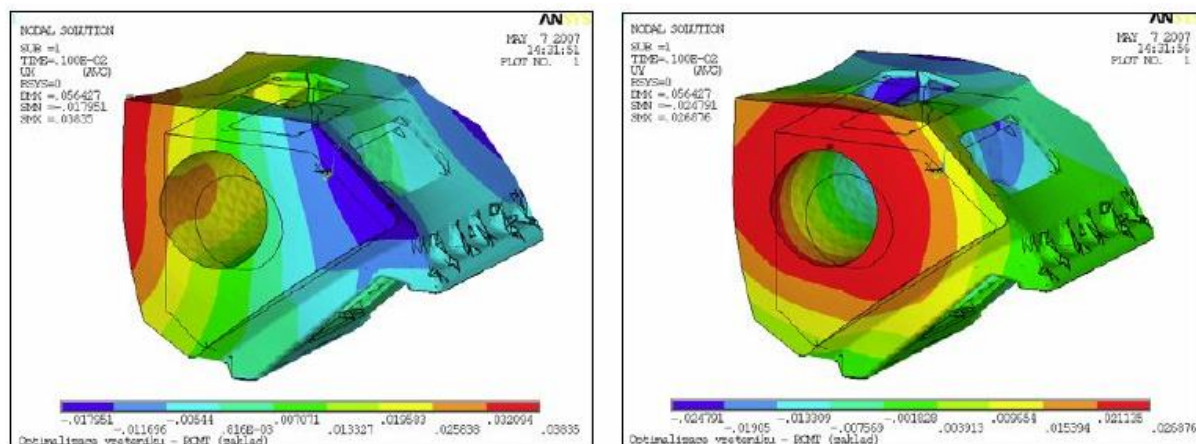
Na počátku zpracovali analýzu teplotních polí a poté vypracovali prediktivní teplotně-mechanické modely konstrukčních částí obráběcího stroje. Na základě dosažených výsledků navrhli takové varianty konstrukce, u nichž se předpokládaly menší teplotní deformace, a aplikací těchto modelů potom potvrdili zlepšení strukturálních funkcí stroje. U zmíněného kuličkového šroubu se pomocí teplotně-mechanického modelu celé soustavy pohonu s kuličkovým šroubem podařilo problém zadírávání vyřešit návrhem dostatečného dimenzování chlazení zjištěných relevantních zdrojů tepla. Hlavní příčinou nežádoucího teplotně-mechanického chování vřeteníku byla ložiska, z nichž se šířilo teplo a způsobovalo nárůst teploty a deformaci skříň vřeteníku. po zavedení vhodných okrajových podmínek bylo možno modelovat skříň vřeteníku izolovaně od ostatních částí stroje Obr. 39. [33]



Obr. 39 Model stávající konstrukce skříň vřeteníku [33]

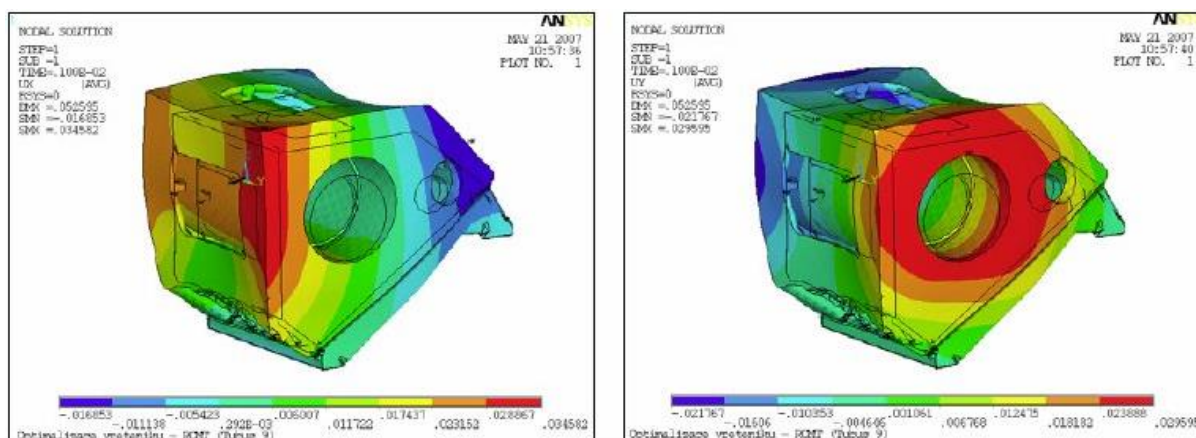
Dále byla zadána geometrie vřeteníku ve formě objemového modelu a přidány potřebné počáteční a okrajové podmínky (např. způsob uchycení vřeteníku k loži stroje, zdroje tepla z konvekce, teplota ložisek apod.). Takto vytvořený model se podrobil teplotně-mechanické

analýze, jejímž prvním výstupem bylo pole posunutí a teplotní pole stávajícího vřeteníku ve stacionárním stavu Obr. 40. [33]



Obr. 40 Zjištění deformace původní varianty - posuvové pole ve směru osy X a Y [33]

Na základě získaných poznatků se navrhlo celkem 10 variant úpravy vřeteníku, zahrnující například zvětšení průměru středového tubusu, přidání podélných žebër na tubus či zvětšení průměru středového tubusu včetně přidání odlehčovacího otvoru na čele vřeteníku. Tato poslední varianta byla vyhodnocena jako nejlepší Obr. 41. [33]

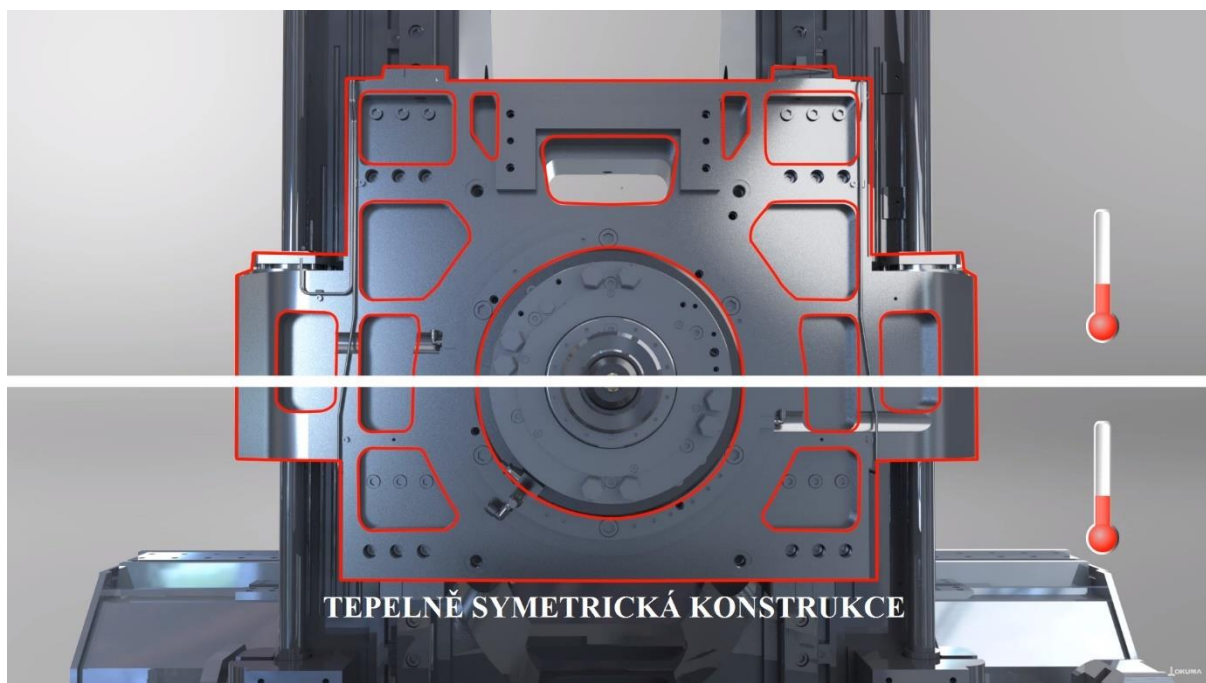


Obr. 41 Deformace navržené varianty - posuvové pole ve směru X a Y [33]

5.2.2 Způsob kompenzace tepelných vlivů firmou OKUMA

Vřetena od firmy Okuma jsou vybavena ochrannými systémy Thermo Friendly Concept, který reaguje na vnější a vnitřní tepelné změny. Metoda kombinuje řídicí techniku a konstrukci stroje tak, aby minimalizoval množství vznikajícího tepla a řešil teplo, které eliminovat nelze. Ve spojení s přesnou kompenzací tepelné deformace je výhodou rozměrová stabilita po dlouhých, nepřetržitých chodech. Má také za úkol pomáhat zlepšovat kvalitu, šetřit čas a snižovat výskyt odpadních produktů. Tepelně aktivní stabilizátor je rozdělen do dvou složek: [34]

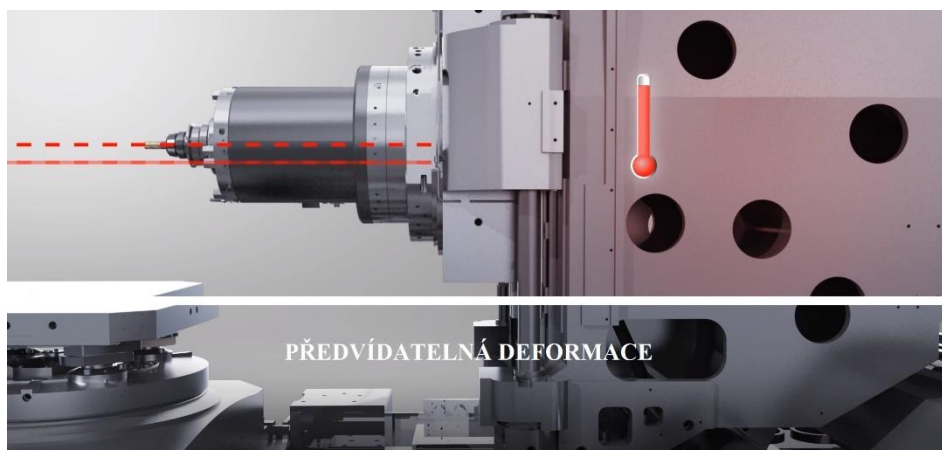
- TAS-S shromažďuje informace o teplotě vřetena, otáčení vřetena, změny otáček vřetena a zastavení vřetena. Výsledkem je, že deformace vřetena a osy Z jsou přesně řízeny.
- TAS-C je založen na tepelných vlastnostech stroje. Kde s vhodně umístěnými teplotními čidly a údaji o poloze osy posuvu, předvídá a přesně řídí tepelnou deformaci konstrukce stroje při změnách okolních teplot.



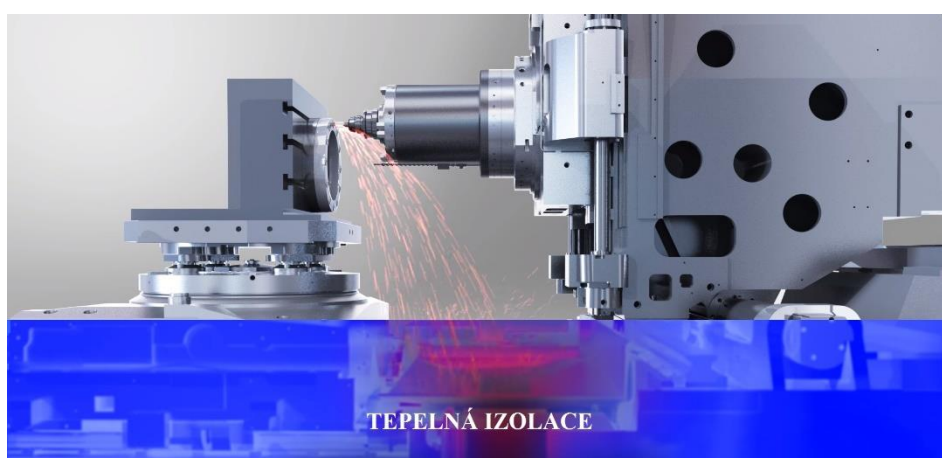
Obr. 42 Ukázka tepelně symetrické konstrukce od firmy OKUKMA [34]

Tato technologie zároveň umožňuje následné procesy:

- Odstraňuje potřebu zahřátí stroje CNC
- Odstraňuje ruční úpravy obsluhy pro kompenzaci změny teploty
- Předvídá možnou deformaci a kontroluje složité zkroucení a sklopení
- Lze řezat submikronově přesné povrchy



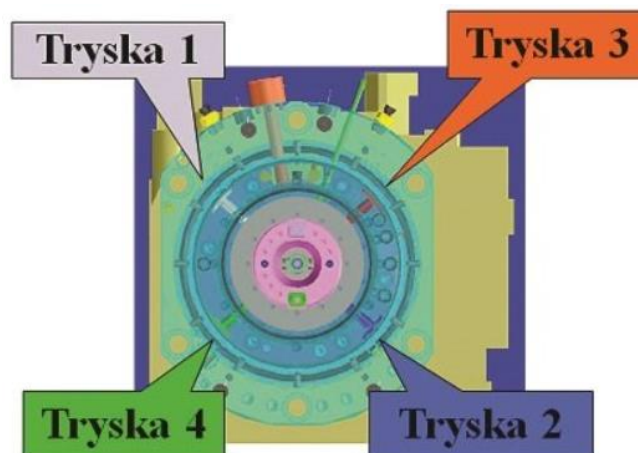
Obr. 43 Ukázka předvídatelné deformace systému od firmy OKUMA [34]



Obr. 44 Ukázka izolované části stroje od firmy OKUMA [34]

Mazání ložisek

Ložiska frézovacích vřeten Okuma jsou mazána olejovou mlhou. Díky vlastnostem olejové mlhy, která je zvenku chlazená vzduchem, je schopna udržet teplotu ložisek na nízké úrovni. Je používáno jen malé množství oleje, což má za výhodu jen minimální kontaminaci okolí. Olejová mlha je do vřeten přiváděna po obvodu jeho uložení. Díky tomu je teplota rozložena rovnoměrně podél celého vřeten, čímž jsou radiálně minimalizovány teplotní dilatace rotace vřeten. Olejová mlha je zároveň schopna ložiska čistit. [34]



Obr. 45 Symetrické mazání ložisek frézovacích vřeten Okuma [34]

6 Zhodnocení aktuálních kompenzačních metod

Metoda konečných prvků (FEM)

- **Výhoda** tohoto systému je možnost rychlé, automatické diskretizace tělesa, který není omezen počtem a rozmanitostí elementů. Díky rychlým řešením při tvorbě modelů jsou velice atraktivní pro ostatní uživatele. Existují různé programy, které obsahují mnoho modulů, umožňující řešit různé fyzikální úlohy. Jako příklad lze uvést řešení proudění tekutin, nástroje pro lineární a nelineární úlohy, statické a dynamické úlohy a další. Je také vhodná pro větší opakovatelnost, případně robustní stroje, kde se nepřesnosti pohybují ve vyšších řádech.
- **Nevýhoda** tohoto systému je, že na rozdíl od jiných druhů modelování nedokáže simulovat reálné pracovní podmínky stroje. Z toho důvodu se využívají především na optimalizaci systému, predikci systému, který je v navrhované fázi a analýzu aktuálního systému.

Metoda konečných prvků a diferencí (FDEM)

- **Výhoda** spočívá v tom, že je systém schopný provést výpočet nestacionárního, teplotně-pružného chování systému jako je například obráběcí stroj.
- **Nevýhoda** tohoto systému spočívá v samotné výhodě FEM a to konkrétně v tom, že tu není možnost rychlé, automatické diskretizace tělesa, který je omezen počtem a rozmanitostí elementů.

Vícenásobná lineární regrese (MLR)

- **Výhoda** tohoto systému spočívá v tom, že je levný a samotný algoritmus je získán velice rychle, protože jsou měření často sestavná jen na základě jednoho měření.
- **Nevýhoda** spočívá v tom, že díky konstantním otáčkám vřetena bez pohybu dalších os a bez zahrnutí obrábění, model neodpovídá přesné realitě. Proto je jeho spolehlivost velice nízká. To také spočívá v tom, že chybí informace z míst, kde nejsou teplotní senzory a také nerespektují principy vedení tepla.

Přenosová funkce (PF)

- **Výhoda** tohoto systému je, superponování a aproximování negativních vlivů, které ovlivňují výslednou teplotní chybu, čímž získáme komplexní teplotně-elastické chování stroje. Oproti MLR modelu je umístění senzorů jednoznačné a senzor je třeba umístit co nejbližší ke zdroji tepla. Také je zde možnost využití dat z řídicího systému.

Regresní analýza (MRA)

- **Výhoda** spočívá v tom, že fyzický význam modelu lze snadno interpretovat a je k dispozici možnost získání každého citlivého koeficientu. Její robustní podmínky, které se liší od podmínek použitých při odhadu modelu, mohou být zvýšeny pečlivým výběrem vstupních proměnných pomocí postupné regresní analýzy.

Neuronové sítě (NN)

- **Výhoda** této metody spočívá v tom, že lze automaticky naučit velmi složité modely. Má velmi dobrý výkon při tvorbě nelineárních funkcí. Na rozdíl od regresního modelu může být teplotní chyba vřetená modelována ve více směrech pouze jednou neuronovou sítí, protože má více výstupů. To má za následek významné snížení únavného úkolu modelování.
- **Nevýhoda** je, obtížná interpretace fyzického významu z modelu. Nejprve musí neuronové sítě natrénovat algoritmus na základě naměřených dat, a až poté dokáže neuronová síť tepelné chyby vřetená předpovídat.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo popsat tepelné vlivy působící na obráběcí stroj, následně shrnout aktuální kompenzační systémy a modely, kterými se dají tyto tepelné vlivy redukovat.

Toto téma je na akademické půdě i v průmyslové praxi řešeno již po mnoho let. Přesto stále chybí jasně definovaná funkční kompenzační metoda. Tepelné vlivy působící na obráběcí stroj můžou být redukovány pasivní či aktivní kompenzací. Tyto tepelné vlivy se dají měřit kontaktními nebo bezkontaktními senzory, které jsou v práci popsány. Pro vytvoření co nejpresnějšího tepelného modelu je nejdůležitější umístění a volba počtu vhodných senzorů.

Základním návrhovým úkolem je důsledné zamezení existence tepelných mostů mezi zdroji tepla a částmi, které mají vliv na geometrickou přesnost stroje. Nejjednodušší kompenzací těchto tepelných vlivů je volba materiálu pro rám a konstrukci daného obráběcího stroje ještě před samotnou výrobou. Pokud je to možné, je vhodné k tepelné kompenzaci zvolit tepelně symetrickou konstrukci stroje. Dále správné umístění zásobníku olejů a pasivních chladičů. Obvykle jsou zásobníky provozních kapalin umísťovány co nejbližší spotřebičům, avšak z důvodu teplotního ovlivňování stroje je výhodnější umístit je na opačný konec stroje, čímž se dosáhne rovnoměrnějšího teplotního rozložení tepelných zdrojů.

Další možnou redukcí tepelných vlivů je volba jednoho z aktuálních aktivních modelů kompenzace. Nelze říci, který z nich je nejvýhodnější a nejekonomičtější, ovšem každý z nich má své výhody i nevýhody, které byly shrnuty v kapitole zhodnocení aktuálních kompenzačních metod.

V předposlední kapitole analýza vybrané části stroje, bylo zjištěno, že se největší podíl tepla vyskytuje kolem předních ložisek a rozložení teplotního pole není pro vřeteno a pouzdro rovnoměrné. Z toho je zřejmé, že se budou teploty dále přenášet na ostatní části stroje, a to dále při výrobě povede ke geometrickým nepřesnostem.

Použité informační zdroje

- [1] MAYR, Josef, Jerzy JEDRZEJEWSKI, Eckart UHLMANN, M. ALKAN DONMEZ, Wolfgang KNAPP, Frank HÄRTIG, Klaus WENDT, Toshimichi MORIWAKI, Paul SHORE, Robert SCHMITT, Christian BRECHER, Timo WÜRZ a Konrad WEGENER. Thermal issues in machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2012, **61**(2), 771–791. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2012.05.008
- [2] *Měření a korekce chyb obráběcího stroje ve výrobním procesu* [online]. [vid. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/mereni-a-korekce-chyb-obrabeciho-stroje-ve-vyrobnim-procesu.html>
- [3] MARCEL. KREIDL. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN, 2005. Senzory neelektrických veličin ; díl 1. ISBN 978-80-7300-145-2.
- [4] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. Vysoké učení technické v Brně. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [5] *PŘEHLED TEPLITNÍCH STUPNIC* [online]. [vid. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.prevod.cz/popis.php?str=220&parent=y>
- [6] ENENKL, Vladimír. *Termomechanika*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1966. Učební texty vys. škol.
- [7] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0*. Praha: MM publishing, sro, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.
- [8] FRANK P. INCROPERA. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 4th ed. New York: Wiley, 1996. ISBN 978-0-471-30460-9.
- [9] *Teplotní roztažnost Přenos tepla Kinetická teorie plynů* [online]. 2019. Dostupné z: <https://docplayer.cz/13892613-Teplozni-roztaznost-prenos-tepla-kineticka-teorie-plynu.html>
- [10] ĎAĎO, Stanislav. *Senzory a měřicí obvody*. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-02057-9.
- [11] BENTLEY R.E. (EDITOR): *Hanbook of Temperature Measurement*. Springer Verlag, 1998.
- [12] *Snímače teploty se stonkem do 400°C | Bureš Brno* [online]. [vid. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.buresbrno.cz/snimace-teploty-se-stonkem-do-400-c?itemsPerPage=12>
- [13] *PRINCIP MĚŘENÍ TEPLITY spočívá v porovnání teploty daného tělesa s definovanou stupnicí. - PDF* [online]. [vid. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/8363737-Princip-mereni-teploty-spociva-v-porovnani-teploty-daneho-telesa-s-definovanou-stupnici.html>
- [14] *Tabulky čidel | Rawet s.r.o.* [online]. [vid. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.rawet.cz/sortiment/tabulky-cidel?categoryId=52>

- [15] *ELUC* [online]. [vid. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/959>
- [16] *Thermistance - thinking* [online]. [vid. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.hellopro.fr/thermistance-thinking-2015661-4427-produit.html>
- [17] Polovodičový odporový teploměr. *E-automatizace* [online]. 28. květen 2012. Dostupné z: <http://www.eautomatizace.cz/ebooks/mmr/v/0322c-OdpTermist.htm>
- [18] *Polovodičové senzory teploty* [online]. 2019. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/bmms/projekty_2004/Benes/soubory/pols.html
- [19] *Řešení tepelných deformací obráběcích strojů* [online]. [vid. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/reseni-tepelnych-deformaci-obrabecich-stroju.html>
- [20] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [21] PATRICK DE VOS, CORPORATE TECHNICAL EDUCATION MANAGER, SECO TOOLS. *Tepelné zatížení při frézování* [online]. 20. srpen 2015. Dostupné z: [http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews\[tt_news\]=6420&cHash=33e28a77c9&type=98](http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=6420&cHash=33e28a77c9&type=98)
- [22] *ČSN ISO 230-3 (200300) - Technické normy ČSN* [online]. [vid. 2019-04-24]. Dostupné z: http://www.technicke-normy-csn.cz/200300-csn-iso-230-3_4_86567.html
- [23] *Thermal Analysis for Condition Monitoring of Machine Tool Spindles - IOPscience* [online]. [vid. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://iopscience-iop-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1088/1742-6596/364/1/012088>
- [24] *12 Things to Consider When Buying an Infrared Camera - Grainger Industrial Supply* [online]. [vid. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.grainger.com/content/supplylink-12-things-buying-infrared-camera>
- [25] LI, Yang, Wanhua ZHAO, Shuhuai LAN, Jun NI, Wenwu WU a Bingheng LU. A review on spindle thermal error compensation in machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2015, **95**, 20–38. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2015.04.008
- [26] MÖHRING, Hans-Christian, Christian BRECHER, Eberhard ABELE, Jürgen FLEISCHER a Friedrich BLEICHER. Materials in machine tool structures. *CIRP Annals* [online]. 2015, **64**(2), 725–748. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2015.05.005
- [27] SHAMRAY, Sergey, Amir DANESHI a Bahman AZARHOUSHANG. High Efficiency, High Speed Grinding of a Composite Material Consisting of Polymer Concrete and Steel Structures. *Procedia CIRP* [online]. 2016, **46**, 7th HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting, 607–610. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2016.03.201

- [28] *Konstrukce CNC obráběcích strojů (4) | Technický týdeník* [online]. [vid. 2019-05-13]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/konstrukce-obrabecich-stroju/konstrukce-cnc-obrabecich-stroju-4_20378.html
- [29] *Stránský a Petržík – CNC stroje FEELER – Vertikální obráběcí centra – Řada NBP – NBP-1300(A) – NBP-1300(A) - konstrukce* [online]. [vid. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.stranskyapetrzik.cz/stroje/feeler/vmc/nb/nb-1300/nb-1300-konstrukce/>
- [30] QIANJIAN, Guo a Yang JIANGUO. Application of projection pursuit regression to thermal error modeling of a CNC machine tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2011, **55**(5), 623–629. ISSN 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-010-3114-4
- [31] *Pokročilé teplotní kompenzace portálového obráběcího centra* [online]. [vid. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pokrocile-teplotni-kompenzace-portaloveho-obrabeciho-centra.html>
- [32] Evaluation of Thermal Characteristics of a Direct-Connection Spindle Using Finite Element Co-Analysis. *ResearchGate* [online]. [vid. 2019-05-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/286312573_Evaluation_of_Thermal_Characteristics_of_a_Direct-Connection_Spindle_Using_Finite_Element_Co-Analysis
- [33] *Cesty ke zvýšení produktivity při obrábění složitých obrobků (3) | Technický týdeník* [online]. [vid. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/ze-zivota-vyzkumneho-centra/cesty-ke-zvyseni-produktivity-pri-obrabeni-slozitych-obrobku-3_30334.html
- [34] *Vřetena frézovacích strojů* [online]. [vid. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/vretena-frezovacich-stroju.html>

Seznam použitých zkratek a symbolů

zkratka	anglický popis	český popis
NTC	negative temperature coefficient	negativní teplotní koeficient
PTC	positive temperature coefficient	pozitivní teplotní koeficient
TCP	tool center point	středový bod nástroje
ETVE	environmental temperature variation error	odchylka teploty prostředí
CFRP	carbonfibre-reinforced plastic	plast vyztužený karbonovým vláknem
FEM	finite element method	metoda konečných prvků
FDM	finite difference method	metoda konečných diferencí
FDEM	finite difference element method	metoda kon. diferenčních prvků
MRA	multivariable regression analysis	multivariační regresní analýza
PPR	projection pursuit regression	regresní metoda projekce
MLR	multiple linear regression	vícenásobná lineární regrese
NN	neural network	neuronová síť
ANN	artificial neural network	umělá neuronová síť
RBF	radial basis functions	funkce radiální základny

Symbol	Jednotka	Popis
T	[K]	teplota v Kelvinech
t	[°C]	teplota ve stupních Celsia
Q	[J]	teplo
m	[kg]	hmotnost soustavy
λ	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	tepelná vodivost
α_1	[W · m ⁻² · K]	součinitel přestupu tepla
q	[W · m ⁻² · K ⁻⁴]	Stefanova-Boltzmannova konstanta
ε	[-]	poměrná zářivost
σ	[S · m ⁻¹]	konduktivita
n	[-]	počet elektronů v jednotkovém objemu
e	[C]	elementární náboj
R ₀	[Ω]	odpor čidla při teplotě 0 °C
R ₁₀₀	[Ω]	odpor čidla při teplotě 100 °C
ΔE	[mm]	šířka mezery mezi energetickými hladinami
k	[J · K ⁻¹]	Boltzmanova konstanta
A	[J]	práce
L _f	[mm]	konečná délka
L _i	[mm]	počáteční délka
T _f	[°C]	konečná teplota
T _i	[°C]	počáteční teplota
α	[(°C) ⁻¹]	lineární součinitel tepelné roztažnosti